

## CMAQ-pollen 모델을 이용한 참나무 꽃가루 확산 고해상도 수치모의 및 검증

### A High-resolution Numerical Simulation and Evaluation of Oak Pollen Dispersion Using the CMAQ-pollen Model

오인보 · 김규량<sup>1)</sup> · 방진희 · 임윤규<sup>2)</sup> · 조창범<sup>1)</sup> · 오재원<sup>3)</sup> · 김양호<sup>4)</sup> · 황미경<sup>5),\*</sup>

울산대학교 의과대학 환경보건센터, <sup>1)</sup>국립기상과학원 응용기상연구과,  
<sup>2)</sup>국립기상과학원 환경기상연구과, <sup>3)</sup>한양대학교 구리병원 소아청소년과,  
<sup>4)</sup>울산대학교 의과대학 직업환경의학교실, <sup>5)</sup>부산대학교 대기환경과학과  
(2016년 12월 6일 접수, 2017년 1월 4일 수정, 2017년 1월 25일 채택)

Inbo Oh, Kyu Rang Kim<sup>1)</sup>, Jin-Hee Bang, Yun-Kyu Lim<sup>2)</sup>, Changbum Cho<sup>1)</sup>,  
Jae-Won Oh<sup>3)</sup>, Yangho Kim<sup>4)</sup> and Mi-Kyoung Hwang<sup>5),\*</sup>

*Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine*

<sup>1)</sup>*Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research*

<sup>2)</sup>*Environmental Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research*

<sup>3)</sup>*Department of Pediatrics, Hanyang University Guri Hospital,*

*Hanyang University College of Medicine, Guri*

<sup>4)</sup>*Department of Occupational & Environmental Medicine, University of Ulsan College of Medicine*

<sup>5)</sup>*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University*

(Received 6 December 2016, revised 4 January 2017, accepted 25 January 2017)

### Abstract

The aim of this study is to evaluate the accuracy and variability of the oak pollen concentrations over the Seoul metropolitan region (SMR) simulated by the Community Multiscale Air Quality (CMAQ)-based pollen dispersion model, which is the CMAQ-pollen model integrated with the improved oak pollen emission model (PEM-oak). The PEM-oak model developed is based on hourly emission flux parameterization that includes the effects of plant-specific release, meteorological adjustment, and diurnal variations of oak pollen concentrations. A 33 day-run for oak pollen simulation was conducted by the CMAQ-pollen model with a 3 km spatial resolution for the SMR during the 2014 spring pollen season. Modeled concentrations were evaluated against the hourly measurements at three Burkard sampling sites. Temporal variations of oak concentrations were largely well represented by the model, but the quantitative difference between simulations and measurements was found to be significant in some periods. The model results also showed that large variations in oak pollen concentrations existed in time and space and high concentrations in the SMR were closely associated with the regional transport under strong wind

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : hmk1001@pusan.ac.kr

condition. This study showed the effective application of the CMAQ-pollen modeling system to simulate oak pollen concentration in the SMR. Our results could be helpful in providing information on allergenic pollen exposure. Further efforts are needed to further understand the oak pollen release characteristics such as interannual variation of the oak pollen productivity and its spatio-temporal flowering timing.

**Key words** : Oak pollen, Seoul metropolitan region, CMAQ-pollen model, Pollen emission model

## 1. 서 론

꽃가루는 알레르기 질환을 일으키는 중요한 공기 중 항원(aeroallergens)으로 잘 알려져 있다(Sofiev *et al.*, 2013). 최근에는 기후변화와 연계된 꽃가루 비산량의 증가 및 알레르기유발성(allergenicity)의 변화(Sofiev *et al.*, 2013; Singer *et al.*, 2005; Beggs, 2004)로 인해 알레르기 질환 관리에 중요한 대기환경인자로 부각되고 있다. 아울러 국내·외 알레르기 질환 유병 인구의 증가 경향과(Healthcare Bigdata Hub, 2014; D'Amato *et al.*, 2007; Asher *et al.*, 2006) 꽃가루 항원에 대한 높은 감작률은(Oh *et al.*, 2009a, 2009b; Kim *et al.*, 1999) 시·공간적 꽃가루분포의 정확한 이해 및 예측의 필요성을 시사한다.

알레르기 꽃가루의 시·공간적 변동과 예측에 관한 연구들은 유럽을 중심으로 2000년 전후로 시작되었다(Helbig *et al.*, 2004; Campbell *et al.*, 1999; Corden and Millington, 1999; Cabezudo *et al.*, 1997; Norris-Hill, 1995). 최근에는 제한된 꽃가루 모니터링자료와 통계 모델의 한계를 보완하기 위해 꽃가루 수치모델링 방법이 구체적으로 제안되었고(Efstathiou *et al.*, 2011; D'Amato *et al.*, 2007; Sofiev *et al.*, 2006), 이후 배출량 추정식의 개선과 해상도 높은 입력자료의 적용을 통해 수치모델을 이용한 꽃가루 농도예측의 신뢰성이 높아지고 있다. Sofiev *et al.* (2006)은 SILAM (System for Integrated modeLling of Atmospheric coMposition) 모델을 개발하여 서유럽 전역을 대상으로 꽃가루 장거리 수송을 모의하였고 이후 SILAM에 꽃가루 비산시기 결정모델을 추가하고 자작나무 꽃가루 배출 모수화식을 개선하였다(Sofiev *et al.*, 2013). Efstathiou *et al.* (2011)은 수정된 Helbig *et al.* (2004) 모수화식을 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) 모델에 적용하여 2002년 미국 뉴욕지역을 대상으로 꽃가루 모델링을 수행하였다. Zink *et al.* (2013)은 개화 후 꽃가루의 대

기유입 전단계인 pollen reservoir 단계(꽃이 맺혀있는 단계)를 도입하여 배출량 산정 모수화식을 개선하고 기존 COSMO-ART (COntortium for Small-scale MOdelling - Aerosols and Reactive Trace gases) 모델의 정확도를 평가하였다.

국내에서는 꽃가루 농도 예측과 관련하여 기상인자와의 관련성에 근거한 통계모델 개발 연구가 최근 있었고(Oh, 2009; Park *et al.*, 2008), 이를 기반으로 기상청에서는 참나무, 소나무, 잡초류를 대상으로 꽃가루 농도 위험지수 예보를 시행 중에 있다(KMA, 2016). 하지만 통계모델의 지역적 제한성과 농도값에 대한 불확실성이 크고 해상도 높은 정량적 예측에는 한계가 있다. 최근 Oh *et al.* (2012)이 울산지역을 대상으로 WRF (Weather Research and Forecasting Model)-CMAQ을 이용하여 참나무 꽃가루 모델링을 최초로 수행하고 꽃가루 시·공간적 변화를 전반적으로 재현하였다. 이를 근간으로 수도권 지역을 대상으로 한 참나무 꽃가루 수치모델링 시스템을 구축하고 개선하는 연구가 수행되었다(National Institute of Meteorological Sciences, 2015, 2014, 2013). 또한 Lim *et al.* (2015)는 로버스트 다중회귀식을 이용하여 꽃가루 배출량을 추정하고, 전국기반 UM (Unified Model)-CMAQ 모델을 이용한 참나무 꽃가루 모델링을 수행하여 국내 예보를 위한 기초연구가 되었다.

이러한 국내·외 연구들에서 최근 시도되고 있는 꽃가루 수치모델링은 알레르기질환 관리와 예방에 중요한 잠재적 노출 정보를 제공해 줄 수 있다는 측면에서 의미가 크다. 기후변화와 연계해서도 미래의 꽃가루 비산기간, 비산량 변화를 예측하고 대응할 수 있는 중요한 부분이기도 하다(Duhl *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013). 하지만 성공적인 수치모델링에 있어 꽃가루 배출량 추정의 불확실성, 물리적 특성과 침적과정의 정확한 고려, 식생입력자료의 한계 극복을 위해서 지속적인 연구가 필요할 것이다.

이 연구에서는 우리나라의 대표적인 수종이자 알레르기성 (allergenicity)이 높은 참나무 꽃가루를 (Oh, 2007; Lee *et al.*, 2006) 모의할 수 있는 수정된 배출량 모델과 CMAQ 모델을 제시하고, 수도권 지역 봄철 사례기간 참나무 꽃가루 확산에 대한 해상도 높은 모델링을 수행하였다. 아울러 대상영역 내 모니터링된 실측 꽃가루 농도와 비교를 통해 모델링 결과를 검증하고 향후 참나무 꽃가루 수치예보의 가능성을 평가하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 참나무 꽃가루 수치모델링 시스템

꽃가루 수치모델링은 크게 꽃가루 배출량 추정과 대기 배출된 꽃가루의 확산이류 과정을 포함한다. 배출량 추정과정은 신뢰성 있는 꽃가루 농도 예측을 위해 매우 중요한 부분으로 식생 (발생원)의 분포, 꽃가루 생성량과 생물학적 계절변화, 주요 기상인자들과의 관계식 등을 통해 추정 가능하다. 특히 기상인자들과의 관계는 꽃가루 배출량의 단기적 시·공간적 변화를 계산하는데 있어 중요하다. Helbig *et al.* (2004)은 배출량 추정에 마찰속도를 비롯한 기온, 습도, 풍속을 고려하였고, 이는 이후 여러 꽃가루 대기확산모델 연구 (Efstathiou

*et al.*, 2011; Vogel *et al.*, 2008; Sofiev *et al.*, 2006)에 적용 및 응용되었다. 최근에는 Siljamo *et al.* (2013)이 자작나무 꽃가루 대상으로 민감도 모델링을 통해 풍향, 강수, 습도가 배출량 추정에 중요한 기상인자임을 제시하였다.

그림 1은 이 연구에서 제시하는 참나무 꽃가루 수치 모델링 시스템의 구성과 수치모의 흐름도이다. 시스템은 크게 참나무 꽃가루 배출량 추정모델 (PEM-oak)과 기상 입력자료를 생성하는 WRF 모델, 그리고 참나무 꽃가루의 대기 중 이류, 확산, 침적과정을 시·공간적으로 계산할 수 있도록 수정된 CMAQ 모델인 CMAQ-pollen 모델로 구성된다.

먼저 PEM-oak는 Helbig *et al.* (2004)과 Efstathiou *et al.* (2011) 연구에서 제시된 모수화식을 근간으로, 모니터링된 참나무 꽃가루의 분포특성 (계절/일중 변화)과 기상요소와의 관계를 개선하여 고안된 배출량 모델이다. 영역별 배출량 산정은 참나무 분포와 필요한 기상요소를 입력하여 격자별로 계산된다. 여기서 참나무 분포는 수치입상도 (Korea Forest Service, FGIS)를 이용하여 격자별 참나무 면적으로 산출되며, 격자별 기온, 습도, 풍속, 마찰속도, 엽면적지수 (LAI, Leaf Area Index)는 WRF 모델링 결과로부터 입력된다.

CMAQ-pollen 모델은 대기 중으로 배출된 참나무

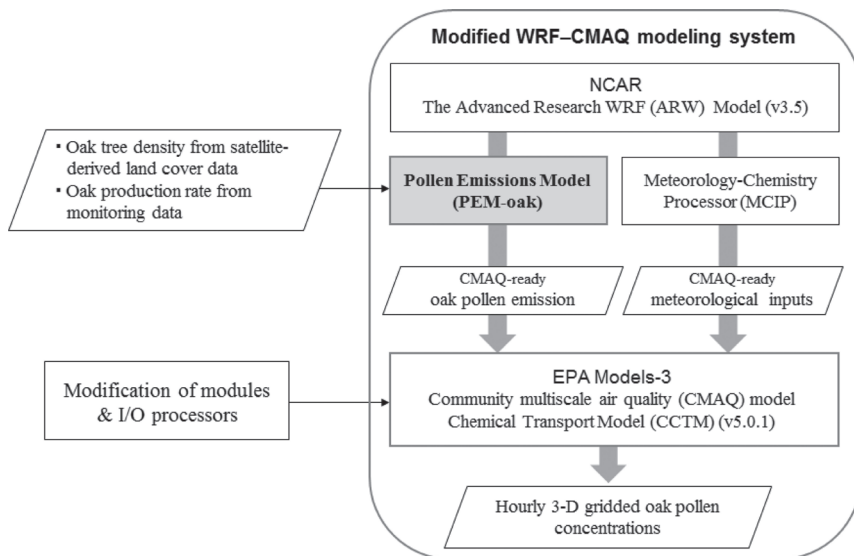


Fig. 1. Schematic flowchart depicting the modified WRF-CMAQ modeling system linked with the PEM-oak model for oak pollen simulations.

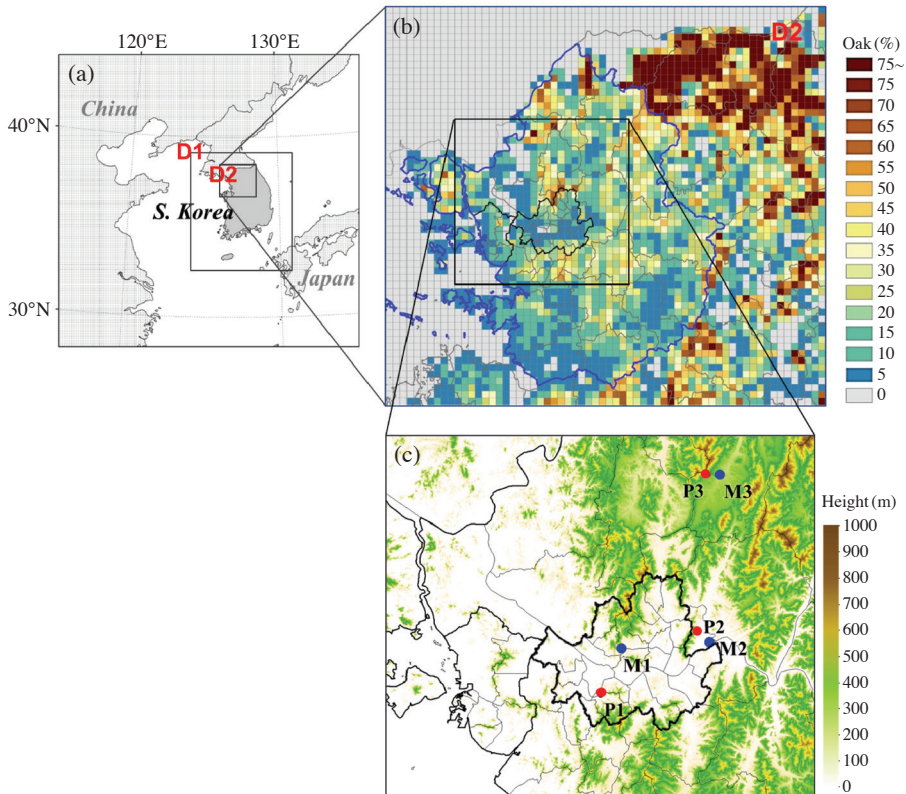
꽃가루의 이류, 확산, 침적과정을 모의할 수 있도록, 본 연구에서 기존 CMAQ 모델에 관련 모듈과 I/O 프로세스를 추가/수정한 모델이다. WRF 모델결과가 입력되어 MCIP(Meteorology-Chemistry Processor) 전처리과정을 통해 산출된 기상인자, PEM-oak 모델에서 계산된 참나무 꽃가루 배출량, 영역별 꽃가루 농도의 초기/경계조건 등이 입력자료로 요구된다. 참나무 꽃가루의 이류, 확산과정은 수정된 CCTM module에서 처리되어 매시간별 격자별 참나무 꽃가루 농도가 계산된다.

**2.2 대상영역, 측정자료, 모델링 기간**

참나무 꽃가루 모델링 대상영역은 그림 2와 같이 구성된다. 한반도영역(D1, 67×79, 9-km 격자간격)의 경우 대기정책 모델링 지원시스템 (Clean Air Policy Modeling System: CAPMOS)에서 제시하는 국가표준

도메인과 동일하다. 수도권영역(D2, 64×58, 3-km 격자간격)은 서울 중심의 수도권 전체를 포함하며 주변 산림지역의 지역규모 꽃가루 수송 영향을 적절히 고려하기 위해 강원도 일부를 비롯한 인근 산림지역을 포함하여 구성하였다. 수도권영역 안에는 기상청에서 운영하는 세 개의 꽃가루 모니터링지점(서울: P1, 구리: P2, 포천: P3)이 위치하며 배출량 모델 개발과 CMAQ-pollen 결과 검증에 이용되었다.

참나무 꽃가루 모니터링자료는 버커드 샘플러 (Burkard 7-day recording volumetric spore sampler) (Burkard, 2001)를 이용하여 채집된 시료를 검경하여 얻어진 농도(단위: grains m<sup>-3</sup>)자료이다. PEM-oak 모델 개발과 관련해서는, 6년간(2009~2014년) P1과 P2 지점에서 모니터링된 일평균 농도자료와 2014년 세 지점의 1시간 평균 농도자료를 이용하였다.



**Fig. 2. (a) Map showing 9-, 3-km grid nests (D1 and D2) used for CMAQ-pollen modeling. (b) Density (%) of oak trees from the FGIS digital forest type map. (c) Topographic feature of the Seoul and its surrounding area. The red dots indicate pollen monitoring sites (P1: Seoul, P2: Guri, P3: Pocheon) and the blue dots indicate meteorological monitoring sites (M1: KMA-ASOS, M2: Guri-AWS M3: Pocheon-AWS).**

농도자료 기반 참나무 꽃가루 비산계절(oak pollen season)을 결정하고, 이 기간은 PEM-oak 모델 비산계수 및 가중치 추정과 모델링기간 설정에 이용되었다. 본 연구에서는 Emberlin *et al.*(1994)이 제시한 방법으로(전체 누적 꽃가루 농도의 1% 이상 시점부터 99% 시점까지) 비산계절을 정의하였고 이에 따라 2014년 비산계절 기간은 P1 지점은 4월 12일~5월 10일, P2 지점은 4월 11일~5월 10일, P3 지점은 4월 15일~5월 9일로 각각 결정되었다. 모델링 기간은 세 지점의 참나무 꽃가루 비산계절 기간을 포함하도록 선정하여, WRF 모델링은 2014년 4월 7일(0000 UTC)부터 5월 11일(0000 UTC)로 35일간을 대상으로 수행되었고, CMAQ-pollen 모델링은 하루의 초기값 적용기간을 포함하여 4월 9일(0000 UTC)부터 5월 11일(0000 UTC)까지 총 33일간 이루어졌다.

### 2.3 WRF 모델링

WRF 모델링을 통해 얻어지는 기상인자는 PEM-oak 모델과 CMAQ-pollen 모델의 입력자료가 된다. 모델의 초기 및 경계조건은 기상청에서 제공하는 6시간 간격의 KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) 5 km 분석장과 GFS (Global Forecast System) 1도 토양수분자료를 이용하였다. 연직층은 100 hPa 이하 44개 sigma layer로 구성되었으며 최하층 고도는 약 32 m이다. 모델링은 단방향 네스팅(one-way nesting) 방법을 통해 수행되었다. 물리옵션은 모든 모델링영역에 대해, Microphysics는 WSM6 scheme, Long wave radiation은 RRTM scheme, Shortwave radiation은 Dudhia scheme, PBL physics는 Yonsei University scheme, Land surface physics는 Noah Land-Surface Model을 각각 적용하였다. 대상지역의 현실적인 지형과 지표면 상태를 WRF 모델링에 반영하기 위하여 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 3초(약 90 m) 지형자료와 국내 환경부에서 제작한 환경공간정보 서비스 EGIS (Environmental Geographic Information System, 2007)의 중분류(해상도 5 m급, 22개 항목) 토지피복자료를 적용하였다.

### 2.4 참나무 꽃가루 배출량 모델 입력자료

그림 3은 PEM-oak 모델의 모수화식(3장에 구체적으로 제시)에 필요한 입력자료, 격자별 참나무 화분 배

출량 추정 과정을 간략히 보여준다. 모수화식의 연중 비산계수 산정을 위해 6년간(2009~2014년) P1과 P2에서 모니터링된 일평균 꽃가루 농도자료를 분석하였다. 또한 세 지점 모두에서 2014년 모니터링된 1시간 평균농도자료를 이용하여 기상조절항과 가중치항(이후 설명)의 계수를 만들었다.

PEM-oak 모델의 입력자료로 격자별 참나무 배출강도의 대리인자인 참나무림의 분포 면적이 요구된다. 고해상도 5차 수치임상도(Korea Forest Service, FGIS)자료(축적 1:5,000, 한반도영역)에서 GIS 수종별 속성정보를 처리하여 참나무분포를 얻었다. 이 자료를 MIMS (Multi-scale Integrated Modeling System) Spatial Allocator에 입력하여 각 격자별 참나무림 면적을 산출하였다(그림 2(b) 참조).

추가적으로 요구되는 격자별 기상인자(지상 2 m 기온, 10 m 풍속, 2 m 비습)와 엽면적지수(LAI), 마찰속도 정보는 WRF 결과에서 얻을 수 있다. 여기서 엽면적지수는 토지피복도에 의존하며, EGIS 토지피복자료를 통해 현실적인 값을 산출할 수 있도록 하였다.

### 2.5 CMAQ-pollen 모델

CMAQ-pollen 모델은 대기 중으로 배출된 참나무 꽃가루의 수송(이류/확산), 침적과정을 모의할 수 있도록 기존 CMAQ 모델(ver. 5.0.1)에서 관련 모듈과 I/O 프로세스를 수정한 모델이다. 입력자료로는 WRF 모델 결과로부터 MCIP 전처리과정을 통해 산출된 기상인자, PEM\_oak 모델에서 계산된 참나무 꽃가루 배출량, 영역별 꽃가루 농도의 초기/경계조건 등이 요구된다.

참나무 꽃가루의 수송과정은 수정된 CCTM module (수평이류: hyamo, 연직이류: vwrif, 수평확산: multiscale, 연직확산: acm2, 에어로졸: aero5, 침적: m3dry)에서 처리되어 시·공간적 격자별 참나무 꽃가루 농도가 계산되어진다. 각 시간대의 꽃가루 농도 계산은 수평이류( $x \rightarrow y$ 방향), 연직이류, 수평확산( $x \rightarrow y$ 방향), 연직확산, 에어로졸 관련모듈이 순차적으로 처리되어 이루어진다. 참나무 꽃가루의 물리적 특성을 고려하기 위해 수정된 연직확산 및 에어로졸 모듈에서 밀도( $\rho$ )를  $1.058 \text{ kg m}^{-3}$  (Zhang *et al.*, 2013)로 입력하였다. 참나무 꽃가루의 광학직경( $D$ )은  $27.7 \mu\text{m}$ 로 Coarse particle로 처리되며(Schueler and Schlunzen, 2006), 식 1은 CMAQ 내 에어로졸 건성침적속도를 계산하는 기본식으로(Bink-

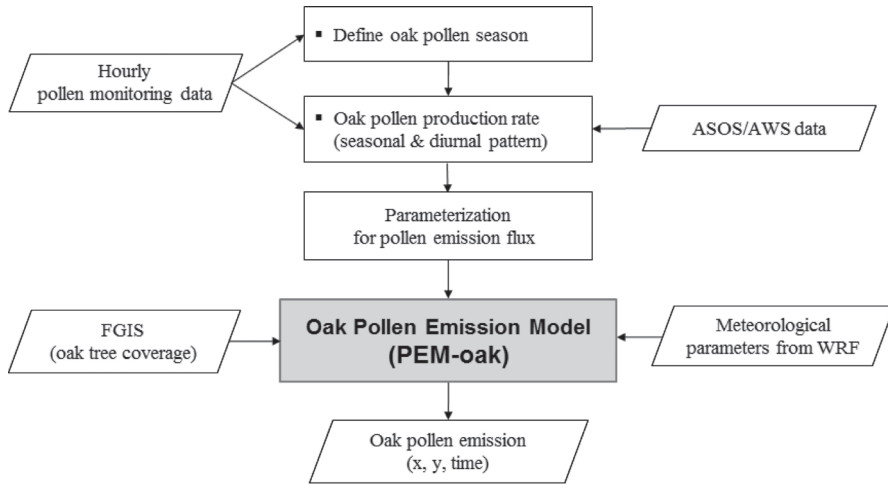


Fig. 3. Flowchart for calculating the gridded oak pollen emissions using the PEM-oak model.

owski and Shankar, 1995) 위의 수치를 적용하여 참나무 꽃가루에 대한 건성침적속도  $v_d$ 가 계산된다.

$$v_d = \left[ \frac{g}{18\nu} \left( \frac{\rho_p}{\rho_{air}} \right) D^2 \right] Cc \quad (1)$$

여기서,  $\nu$  = kinematic viscosity of air

$\rho_p$  = density of particles

$\rho_{air}$  = density of air

$D$  = particle diameter

$Cc$  = linearized slip correction

모델링 수행에 있어 참나무 꽃가루 농도의 초기장은 모든 영역에서  $0 \text{ grains m}^{-3}$ 으로 입력하여 생성시켰다. 경계조건 농도값은 한반도영역에 대해서는 모든 방향으로  $0 \text{ grains m}^{-3}$ 으로 처리하였고 수도권영역과 서울영역은 각각 상위도메인으로부터 계산된 격자 농도값으로 만들었다. 초기값과 경계값이 현실의 수치와 분명 차이가 있으나 현재 선행연구나 참나무 꽃가루의 배경농도에 대한 정보가 없어 정확한 값의 고려가 어렵다.

### 3. 참나무 꽃가루 배출량 추정

꽃가루 배출량은 기상학적 조건 및 이와 관련된 식물학적 주기(Mullins and Emberlin, 1997)와 밀접한 관련을 가지고 있다. 수종의 종류에 따라 꽃가루 총생성

량이 다르며 기상조건 또는 식물학적 리듬에 따라 달라질 수 있다. 또한 수종에 따라 특징 있는 계절 및 일변화를 가지며, 기온, 습도, 풍속 등의 기상조건에 영향을 크게 받는다(Oh *et al.*, 2013).

PEM-oak 모델의 기본 모수화방정식을 식 2에 나타내었다. 이는 Efstathiou *et al.*(2011), Helbig *et al.*(2004), Oh *et al.*(2012)을 바탕으로 수정된 모수화식이다.

$$F_p = c^* \times c_e \times K_e \times u^* \times w_{f(hr)} \quad (2)$$

여기서 참나무 꽃가루의 시간별 방출되는 플럭스( $F_p$ ,  $\text{grains m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )는 수종의 특성농도(characteristic concentration,  $c^*$ ), 개화관련 식물 고유특성을 반영하는 인자(일종의 비산계수)(plant-specific factor,  $c_e$ ), 기상조절 인자(meteorological adjustment factor,  $K_e$ ), 마찰속도(friction velocity,  $u^*$ )에 의존한다. 추가적으로 일중 꽃가루 배출 및 비산과 관련된 가중치( $w_{f(hr)}$ )에 영향을 받게 된다.

먼저 수종의 특성농도  $c^*$ 항은 식 3과 같이 정의된다(Efstathiou *et al.*, 2011; Helbing *et al.*, 2004).

$$c^* = \left( \frac{P_q}{\text{LAI} \times C_h} \right) \quad (3)$$

여기서,  $P_q$ 는 연중 단위면적당 참나무 꽃가루 총생산량(seasonal total oak pollen production)으로, 본 연구에서는 연간 참나무 한 그루당 평균 꽃가루 개수

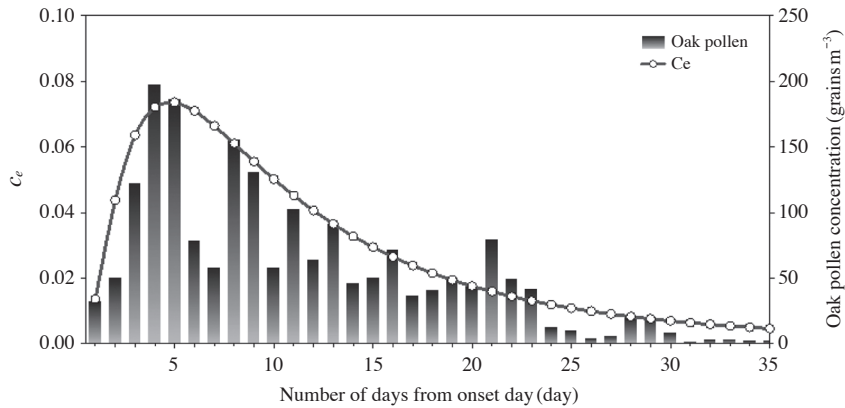


Fig. 4. Variation of oak pollen concentrations from the onset day and its production rate estimated by the log-normal distribution during oak pollen season, 2009~2014.

$2.6 \times 10^{10}$  grains  $\cdot$  tree<sup>-1</sup>  $\cdot$  yr<sup>-1</sup> (Jato *et al.*, 2007), 참나무 밀도 3,390 tree ha<sup>-1</sup> (Saito *et al.*, 2006)을 이용하여  $P_q$ 를  $8.814 \times 10^9$  grains m<sup>-2</sup>로 입력하였다. 연면적지수 LAI는 기상모델 WRF에서 계산된 값을 이용하였고  $C_h$ 는 참나무의 canopy height로 5 m를 입력하였다. 식 3을 통해 얻어진  $c_e$ 값과 식 2의 다른 변수(이후 3.1절부터 설명)들을 고려하여 매시간별 대기로 방출되는 꽃가루 플럭스를 얻을 수 있다. 모수화식을 통해 격자별/매시간별 참나무 꽃가루 배출량이 계산되면, 이는 CMAQ-pollen 모델의 연직 최하층에 입력된다.

### 3.1 비산계수( $c_e$ ) 산정

비산계수  $c_e$ 는 개화와 관련하여 식물 고유의 특징을 반영하는 무차원 계수(dimensionless plant-specific factor)로서 계절적 변화에 따른 꽃가루 배출량을 결정하는 중요한 인자이다. 먼저 P1과 P2 지점에서 모니터링된 일평균 농도자료를 이용하여 참나무 꽃가루 비산 계절(oak pollen season, 6년간 평균 35일)의 비산 시작일을 결정하였다. 그림 4의 막대그래프는 P1과 P2 두 지점의 비산 시작일을 기준으로 이후의 평균 참나무 꽃가루 농도의 일별 변화를 보여 주는 것으로, 비산 시작일 시작 후 급격히 농도가 증가하고 약 4~5일 경에 최고값이 나타난 후 점차 감소하는 패턴을 가진다. 식 4는 이러한 참나무 꽃가루 농도 변화를 근거로 최적의 fitting curve를 log-normal distribution을 가정하여 추정된 모수화식이다.

$$P(d) = 143.2808 \times \exp(-0.5(\ln(d/4.7538)/0.8481)^2) \quad (4)$$

여기서,  $d$ 는 비산시작일로부터의 일수(number of day from pollen onset day)이며,  $P(d)$ 는 추정된 일별 꽃가루 농도(daily potential pollen concentration during pollen season)이다. 비산시작일이 예측되면 식 4에서 일별  $P(d)$ 값이 계산된다. 식 4를 통해 추정된 값과 모니터링 값과의 상관도는  $r=0.88$ 로 높게 나타났다.

최종적으로 일별  $c_e$ 는 oak pollen season 기간의 누적 농도( $P_{total}$ )에 대한 일별  $P(d)$ 의 비로 나타낼 수 있다 (식 5).

$$c_e(d) = \frac{P(d)}{P_{total}} \text{ with } P_{total} = \sum_{d=1}^N P(d) \quad (5)$$

계산된  $c_e$ 값의 변화는 그림 4의 실선으로 나타나 있다. 참나무 꽃가루 비산시기 동안  $c_e$ 값의 변화가 실제 꽃가루 농도의 변화경향을 잘 설명함을 확인할 수 있다. 하지만 꽃의 개화로 인한 꽃가루의 배출은 대기 중 꽃가루 농도와 다른 개념으로  $c_e$ 의 정확한 계산을 위해서는 순림지역에서의 장기간 모니터링 정보가 필요하다.

### 3.2 기상조절항( $K_e$ ) 산정

참나무 꽃가루 배출량 산정에 있어 기상학적 조절항(meteorological adjustment factor,  $K_e$ )은 기상모델로부터 얻어지는 기온( $T$ ), 풍속( $ws$ ), 상대습도( $RH$ )가 인자

로 고려되어 계산되는 항으로, 꽃가루의 비산에 대한 저항을 고려한 식으로 구성된다(Oh *et al.*, 2012; Helbig *et al.*, 2004)(식 6).  $K_e$ 항의  $T_{ie}$ ,  $ws_{ie}$ ,  $RH_{ie}$ 는 각각 기온, 풍속, 상대습도에 대한 임계치이다. 이들 값은 수중에 따라 달라지며 꽃가루 비산과의 관련성을 통해 특정값이 입력된다. 여기서 기온 및 풍속이 임계치 이상으로 증가할 경우  $K_e$ 값은 증가하는 반면, 상대습도는 값이 커질수록 저항으로 작용하여  $K_e$ 값을 감소시킨다.

이 연구에서는  $K_e$  모수화식을 국립기상연구소(2014)의 결과를 바탕으로 임계치와 가중치( $c_1, c_2, c_3$ )를 설정을 하였다(식 6). 기온, 풍속, 습도 모두 꽃가루 비산에 대한 저항을 의미하는  $\alpha$ 항의 분모항으로 고려하였다. 가중치의 경우, 세 개의 기상인자와 참나무 꽃가루 농도와의 상대적인 관련성을 근거로  $c_1$ 을 0.5,  $c_2$ 를 2,  $c_3$ 를 1로 설정하였다.

$$K_e = 1 - \alpha \quad (\alpha < 1) \\ = 0 \quad (\alpha \geq 1) \tag{6}$$

여기서,  $\alpha = \frac{3}{c_1 \frac{T}{T_{ie}} + c_2 \frac{ws}{ws_{ie}} + c_3 \frac{RH}{RH_{ie}}}$

$T_{ie}$  = temperature threshold values (8°C)  
 $ws_{ie}$  = wind speed threshold values (2.5 m s<sup>-1</sup>)  
 $RH_{ie}$  = relative humidity threshold values (90%)  
 $c_1, c_2, c_3$  = plant-specific constants to weigh the influence of the corresponding meteorological resistance ( $c_1 = 0.5, c_2 = 2, c_3 = 1$ )

### 3.3 일중비산가중치( $w_{f(hr)}$ ) 산정

PEM-oak 모델의  $K_e$ 항에서 높은 기온과 낮은 상대습도 값이 입력되면 참나무 꽃가루 배출량이 많아진다. 즉 일반적으로 기온 상승과 습도 감소가 나타나는 오후의 경우 배출량이 증가하게 된다. 하지만 참나무의 꽃가루 농도는 오전~정오경에 최고농도가 나타나며, 경우에 따라 오후에 2차 정점을 보이기도 한다(Corden and Millington, 1999; Kopyla, 1984). 이러한 경향을 모델이 적절히 반영토록 하기 위해 1시간 간격으로 모니터링된 대기 중 농도자료로부터 가중치( $w_{f(hr)}$ )를 추정하여 모델에 고려하였다.

이를 위해 2014년 P1, P2, P3 세 지점에서 측정된 시간별 참나무 꽃가루 농도와 기상조건을 함께 분석하였

다. 대상일 선정은 지점별 꽃가루 집중비산기간(참나무 꽃가루 누적농도의 10~90%에 해당되는 기간) 중 강수가 없는 날, 임의의 특정 풍계가 20시간 이상 지속적으로 존재하는 6일로 하였다. 이러한 조건은 꽃가루 농도 측정값이 참나무 산림지역에서 얻어진 것이 아니므로 수송효과와 관련한 바람변화에 따른 꽃가루 농도 변화를 최대한 배제하기 위해서이다. 선정된 6일(P1: 4월 15, 19일; P2: 4월 19일; P3: 4월 19, 20, 29일)의 시간별 평균농도를 이용하여 최적의 fitting curve를 가우시안 분포를 가정하여 식 7을 추정하였다.

$$w_{f(hr)}(t) = 0.0763 \times \exp(-((t - 5.4775)^2 / (2 \times 9.2140^2))) \tag{7}$$

여기서, 시간(t, hour (LST))별 추정된 값과 모니터링 값의 일중비율의 상관도는  $r = 0.87$  ( $p < 0.01$ ) 이상으로 꽃가루 농도의 일중변화를 잘 설명하는 것으로 평가되었다.

## 4. 참나무 꽃가루 고해상도 수치모의 결과와 검증

### 4.1 WRF 모델결과 검증 및 참나무 꽃가루 배출 분포

CMAQ-pled 모델링 수행에 앞서 WRF 모델링 결과를 검증하고, 격자별 참나무 분포 면적 및 기상모델결과를 입력하여 수행한 PEM-oak 모델결과를 제시하였다.

WRF 수행결과 검증은 모델링 기간(2014년 4월 9일~5월 11일)동안 계산된 기온(2m)과 풍속(10m)을 수도권 ASOS 기상 관측지점(서울, 인천, 수원, 구리, 포천)의 값들과 비교하였다. 표 1에는 통계지표 MBE(mean bias error), MAGE(mean absolute gross error), RMSE(root mean squared error), IOA(index of agreement)를 이용한 검증 결과들을 제시하였다. 전반적으로 WRF 모델이 기온과 풍속의 시간별 변화를 잘 재현하는 모습이다. 기온은 모델치가 관측치와 비교해 다소 과소 평가(-2.6~0.58°C) 되었으나 정확도는 0.9 이상의 높은 값을 나타내었다. 풍속은 모델이 약 1 m s<sup>-1</sup> 과대평가(수원 제외)하였으나 풍속 RMSE, IOA가 모든 지점에서 신뢰구간에 포함되었다.

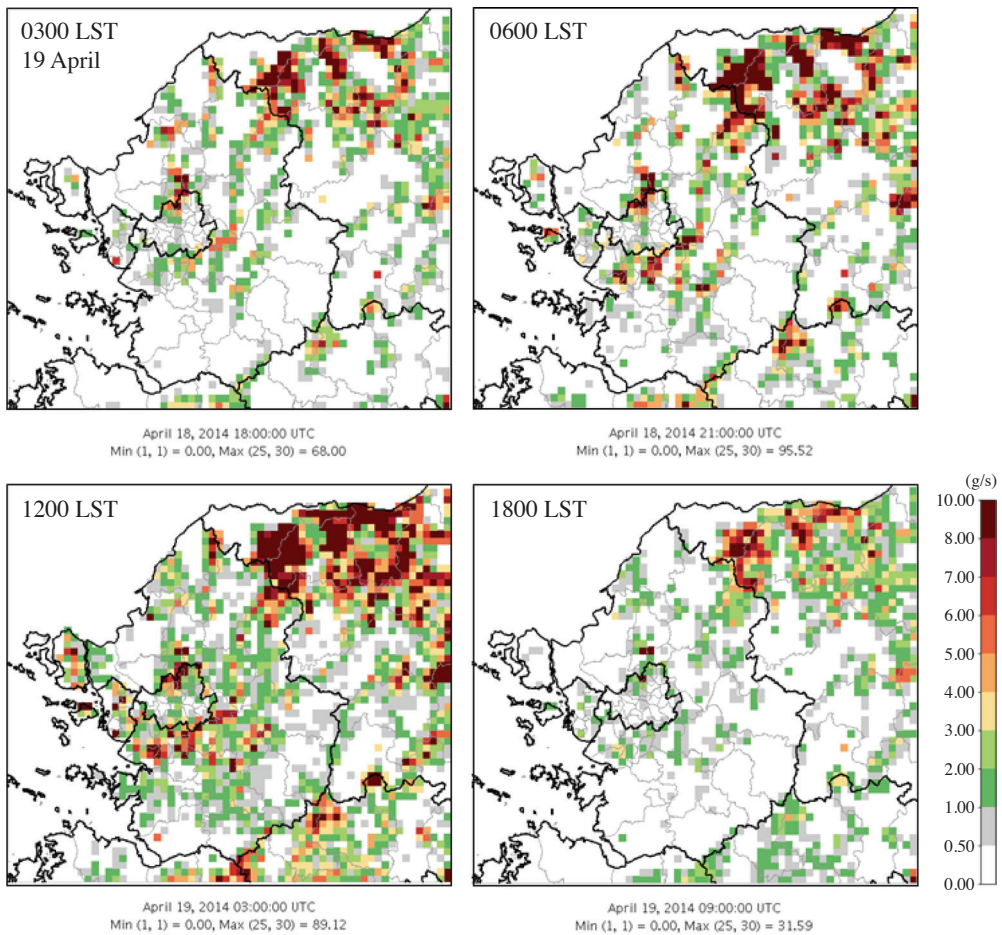
그림 5는 참나무 꽃가루 농도가 높게 나타난 2014년



**Table 1. Evaluation of WRF modeling results: 2-m temperature and 10-m wind speed.**

Meteorological parameters	Statistical index (Confidence range <sup>1)</sup> )	ASOS/AWS sites for evaluation				
		Seoul (108)	Incheon (112)	Suwon (119)	Pocheon (504)	Guri (569)
Temperature (2 m agl.)	MBE ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ )	-1.24	-2.61	0.58	-0.17	-0.58
	MAGE ( $< 2^\circ\text{C}$ )	1.68	3.05	1.45	1.64	1.42
	IOA ( $\geq 0.8$ )	0.93	0.77	0.94	0.95	0.95
Wind speed (10 m agl.)	MBE ( $\pm 0.5$ m/s)	0.29	1.05	-0.22	1.15	1.23
	RMSE ( $< 2$ m/s)	1.36	1.72	1.02	1.99	1.84
	IOA ( $\geq 0.6$ )	0.82	0.74	0.81	0.70	0.69

<sup>1)</sup>Confidence range is included in the EPA Draft Guidance on meteorological model evaluation (2009)



**Fig. 5. Horizontal distributions of oak pollen emission fluxes (Domain 2) calculated with the PEM-oak in April 19, 2014.**

4월 19일 수도권영역 주요 시간대의 참나무 꽃가루 배출량 분포를 보여준다. 그림 2에서 제시된 참나무 밀도의 공간적 분포와 비교해보면, 배출량의 정도가 참나

무 분포에 크게 의존함을 확인할 수 있다. 또한 서울의 광 경기도지역에 상대적으로 높은 배출량이 계산되었고, 도시역을 중심으로 참나무 꽃가루 배출이 거의 없

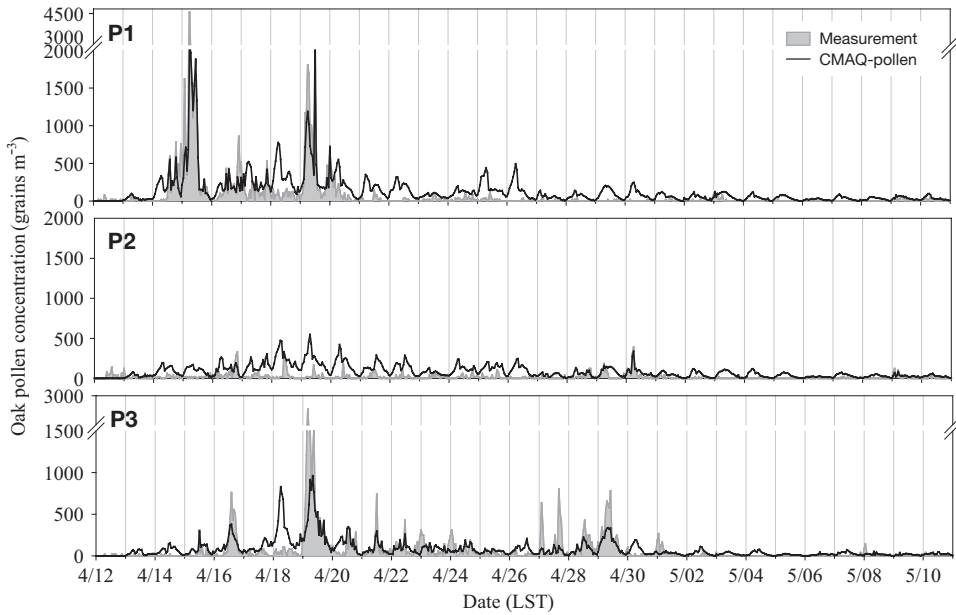


Fig. 6. Comparison between modeled and measured oak pollen concentrations for the 12 April-10 May, 2014.

는 반면 북한산과 도봉산을 중심으로 높은 배출량이 존재함을 알 수 있다. 참나무 꽃가루 배출량의 시간적 변화는 기상요소, 일중 가중치 등이 복합적으로 고려되어 다양한 분포를 확인할 수 있다. 0300 LST부터 꽃가루 배출량이 점차 증가하여 오후(1200~1500 LST)에 최대값을 나타내고 다시 감소하는 모습이다.

#### 4.2 CMAQ-pollen 모델링 결과 및 검증

CMAQ-pollen 모델이 재현한 참나무 꽃가루 농도(4월 12일 0100 LST~5월 11일 0000 LST)를 모니터링 값과의 비교를 통해 시간적 변화의 경향과 정량적인 차이를 평가하였다. 그림 6에는 모델링 영역 내에 위치한 세 지점(그림 1의 P1~P3)에서 모니터링된 참나무 꽃가루의 시간별 농도변화와 함께 각 모니터링 지점들 위치에 해당하는 CMAQ-pollen 수치모의 농도를 제시하였다.

세 지점에서 모니터링된 꽃가루 농도는 정량적인 차이가 존재하지만 4월 초부터 증가하기 시작하여 4월 중후반에 최고치가 나타나고 이후 약 한 달간 증감을 반복하면서 점차 감소하는 경향을 보인다. 특히 서울에 위치한 P1 지점은 4월 14일~20일 기간 동안 급격한 농도 상승 현상과 고농도 빈도가 상대적으로 뚜렷함을

볼 수 있다. 높은 농도가 집중되어 나타난 4월 14일부터 20일까지 늦은 저녁과 새벽에 일 최고 농도가 나타나는 특징이 있고 최고값은 15일 0600 LST에 4,600 grains m<sup>-3</sup>로 기록되었다. 구리에 위치한 P2 지점은 P1 지점 농도와 비교해 농도 수준이 낮고 큰 증감의 변화를 볼 수 없었는데, Lim *et al.* (2015)는 이러한 원인으로 측정소 주변 환경영향(건물 차폐 영향)을 제시된 바 있다. 고농도는 4월 16일과 18일에 328 grains m<sup>-3</sup>, 4월 30일에 390 grains m<sup>-3</sup>로 기록되었다. 포천의 P3 지점 역시 P1, P2와는 다소 차이가 있는 변화를 보였지만 4월 19일의 고농도 패턴은 P1 지점과 유사하다. 최고값은 4월 19일 0500 LST에 2,547 grains m<sup>-3</sup>로 기록되었고 고농도발생 시점은 P1 지점과 유사하게 주로 새벽시간에 많았다.

모델링 기간 세 측정지점에 해당되는 격자의 시간별 모델값(n=2,088)을 대표적인 통계지표를 이용하여 해당 측정값과 비교 검증한 결과 r=0.74, MB=44.9, NMB(%)=80.0%, NME(%)=130.8%, IOA=0.85로 나타났다. 이러한 통계검증 수치들은 모델의 성공적인 수행으로 충분히 설명하기 어렵지만, 이 연구에서 제시한 CMAQ-pollen 모델이 참나무 꽃가루 농도의 전반적인 변화를 예측할 수 있음을 보여준다. 그림 6에서

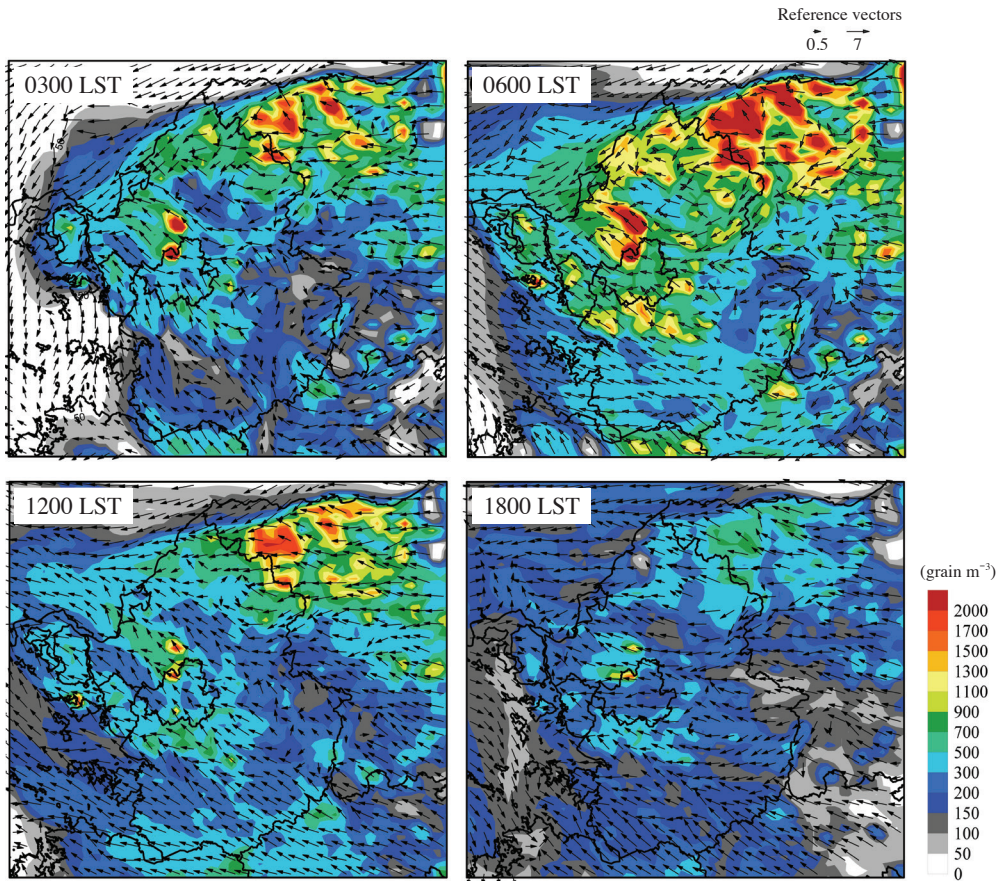


Fig. 7. Horizontal distributions of modeled oak pollen concentrations and wind vectors (Domain 2) in April 19, 2014.

알 수 있듯이 모델을 통해 재현된 참나무 꽃가루 농도는 측정된 농도수준과 다소의 차이는 있지만 전반적인 변화의 패턴은 유사하다. 또한 P1 지점의 경우 CMAQ-pollen 수치모의를 통해 15일, 19일의 고농도 현상이 잘 재현되었음이 확인된다. 한편 18일의 경우, P1과 P3 지점에서 모델결과가 과대평가 되었는데, 이는 오전 중의 기온 과대모의(P1, P3 지점 기준, 최대 +3.9°C)로 꽃가루 배출량 증가가 주된 원인으로 분석된다.

수치모의의 적용은 해상도 높은 공간적 정보를 제공하고 고농도 및 농도변화의 원인을 이해하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 앞선 모델링 결과 검증에서 고농도일 측정값의 변화를 비교적 잘 재현한 4월 19일을 대상으로 주요 시간대별(0300, 0600, 1200, 1800 LST) 모의된 참나무 꽃가루 농도의 공간적 분포를 파악하였다.

그림 7은 사례일 주요 시간대 CMAQ-pollen과 WRF 모델 결과로 참나무 꽃가루 농도와 지상바람(10 m)의 수평 분포를 보여준다. 전반적으로 참나무 꽃가루의 배출량이 많은 지역(그림 5 참고)과 인근에 대기 중 농도가 높게 나타나며 배출량과 유사하게 공간적 농도차이를 알 수 있다. 특히 서울의 북쪽 인근지역과 수도권 북동쪽 외곽 강원도 지역의 고농도 현상이 뚜렷하며 바람에 의한 수송현상을 확인할 수 있다. 19일 새벽과 이른 아침에 나타난 비교적 강한 풍속조건과 남동내지 동풍계열의 바람의 조건들은 산림지역 꽃가루 비산을 강화하고(식 6 참고) 측정지점인 P1 (1,807 grains m<sup>-3</sup>, 0600 KST)과 P3 (2,547 grains m<sup>-3</sup>, 0500 KST)에서의 고농도 원인이 될 수 있다. 정확한 고농도 원인을 파악하기 위해서는 지상 고농도의 원인이 될 수 있는 대기

경제층에서의 혼합과정(Raynor *et al.*, 1974)을 분석하고 산림지역에서 비산된 참나무 꽃가루의 공간적 수송 현상을 보다 면밀히 분석할 필요가 있다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 알레르기 질환과 관련한 대표적인 바이오에어로졸인 참나무 꽃가루를 수치모의 할 수 있는 배출량 모델(PEM-oak)과 수정된 CMAQ 모델(CMAQ-pollen)을 제시하였다. 이 모델들을 이용하여 봄철 약한 달간(2014년 4월 9일~5월 11일) 수도권 지역을 대상으로 고해상도 수치모의를 수행하고 측정값과의 검증을 통해 모델의 적용 가능성을 평가하였다.

PEM-oak 모델에는 고해상도 참나무림 분포정보와 함께 참나무 꽃가루 생성의 식물계절학적 특성을 반영된 비산계수 및 기상의 영향을 적절히 고려하였고, 측정자료를 근거로 일중 비산의 가중치를 추정하여 배출량의 시간적 변화에 대한 정보의 신뢰성을 높였다. 그리고 PEM-oak 모델을 이용하여 한반도-수도권 영역의 참나무 꽃가루 배출량을 산정하였고 참나무 꽃가루의 수송, 침적과정들을 처리할 수 있게 수정된 CMAQ-pollen 모델을 이용하여 모델링을 수행하였다. 그 결과 모델이 동일기간 영역 내 세 지점(서울, 구리, 포천)에서 측정된 농도의 변화 패턴을 전반적으로 잘 재현함을 보여주었고, 향후 모델 개선을 통한 참나무 꽃가루 수치모의의 가능성이 높게 평가되었다. 하지만 단기적 고농도현상을 모델이 충분히 재현하지 못하는 한계가 있었고, 이는 배출량 산정의 불확실성이 주된 원인으로 평가되며 모델 입력자료의 해상도와 정확도를 함께 향상시키는 연구가 반드시 필요함을 보여주었다.

현재 산림현장자료와 선행연구들이 부족해 참나무 꽃가루 배출량 추정의 불확실성은 크다. 대기오염물질과는 달리 꽃가루의 대기 중 배출은 기후조건과 관련하여 매년, 계절적 특성이 강하게 반영된다. 즉 정확한 배출량 추정을 위해 참나무 순림에서의 꽃가루 및 기상인자 집중측정이 지속적으로 필요하며, 이는 비산시작과 연간배출량, 계절적 변화 등 식물계절학적 특성을 모델이 적절히 반영할 수 있는 중요한 자료가 될 것이다. 이와 함께 지속적인 모수화식 개선을 통해 신뢰성 있는 꽃가루 배출량 산정이 가능할 것이다. 또한 참

나무림의 정확한 분포 정보 생성과 경제조건 값의 불확실성 해소(예로 북한지역 배출량 고려) 역시 모델링 예측결과의 정확도를 높일 수 있을 것이며, 참나무 꽃가루 관련 물리적 특성과 관련한 정보 개선, 재비산과정 고려 등도 수치모델 개선 연구에 중요한 향후 연구과제이다.

이 연구에서 시도한 참나무 꽃가루 수치모델링은 봄철 꽃가루 알레르기 질환 예방과 관리에 있어 중요한 실외환경 노출정보를 제공해 줄 수 있다는 측면에서 매우 의미 있는 연구라 사료된다. 아울러 기후변화와 알레르기질환자의 증가 추세와 대응하여 미래의 꽃가루 농도변화를 예측할 수 있는 기초연구로서 활용 가치가 있다.

향후 꽃가루 모니터링 지점의 확대와 모델 개선연구를 통해 참나무 꽃가루에 대한 정량적 농도예측 연구의 고도화가 필요할 것이다. 아울러 참나무 외에 국내 넓게 분포하는 소나무나 알레르기성이 큰 삼나무 등과 같은 수목들의 꽃가루에 대한 모델링 역시, 상급된 배출량 추정의 정확성 문제가 해결된다면 수종 분포에 대한 공간정보가 활용 가능함으로 충분히 수치모의가 가능하리라 사료된다. 또한 이 연구에서 제시한 배출량 모델의 추가적인 개선과 모델의 검증연구가 이루어진다면 대기질 예보와 연계하여 현업에 활용할 수 있는 꽃가루 수치예보의 도입 역시 가능할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 응용기상기술개발연구와 환경부 환경보건센터 재원에 의해 이루어졌습니다.

## References

- Asher, M.I., S. Montefort, B. BjorLSTen, C.K. Lai, D.P. Strachan, S.K. Weiland, H. Williams, and the ISAAC Phase Three Study Group (2006) Worldwide time trends in the prevalence of symptoms of asthma, allergic rhinoconjunctivitis, and eczema in childhood: ISAAC phases one and three repeat multi-country cross-sectional surveys, *Lancet*, 368, 733-743.

- Begges, P.J. (2004) Impacts of climate change on aeroallergens: past and future, *Clinical & Experimental Allergy*, 34, 1507-1513.
- Binkowski, F.S. and Shankar, U. (1995) The regional particulate matter model: 1. Model description and preliminary results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 100(D12), 26191-26209.
- Burkard (2001) 7-day recording volumetric spore trap. (<http://www.burkard.co.uk/7dayst.htm> accessed November 2016)
- Cabezudo, B., M. Recio, J.M. SanchezLaulhe, M.D. Trigo, F.J. Toro, and F. Polvorinos (1997) Atmospheric transportation of marijuana pollen from North Africa to the southwest of Europe. *Atmospheric Environment*, 31, 3323-3328.
- Campbell, I.D., K. McDonald, M.D. Flannigan, and J. Krin-gayark (1999) Long-distance transport of pollen into the Arctic, *Nature*, 399, 29-30.
- Corden, J. and W. Millington (1999) A study of *Quercus* pollen in the Derby area, UK, *Aerobiologia*, 15(1), 29-37.
- D'amato, G., L. Cecchi, S. Bonini, C. Nunes, I. Annesi Mae-sano, H. Behrendt, G. Liccardi, T. Popov, and P. Van Cauwenberge (2007) Allergenic pollen and pollen allergy in Europe, *Allergy*, 62(9), 976-990.
- Duhl, T.R., R. Zhang, A. Guenther, S.H. Chung, M.T. Salam, J.M. House, and E. Salathe (2013) The Simulator of the Timing and Magnitude of Pollen Season (STaMPS) model: a pollen production model for regional emission and transport modeling, *Geoscientific Model Development Discussions*, 6(2), 2325-2368.
- Efstathiou, C., S. Isukapalli, and P. Georgopoulos (2011) A mechanistic modeling system for estimating large-scale emissions and transport of pollen and co-allergens, *Atmospheric Environment*, 45, 2260-2276.
- Emberlin, J., S. Jones, J. Bailey, E. Caulton, J. Corden, S. Dubbels, J. Evans, N. Mcdonagh, W. Millington, J. Mullin, R. Russel, and T. Spencer (1994) Variation in the start of the grass pollen season at selected sites in the United Kingdom 1987-1992, *Grana*, 33(2), 94-99.
- Environmental Geographic Information Service from Ministry of Environment (2007) <https://egis.me.go.kr/> [accessed November 2016].
- Healthcare Bigdata Hub (2014) <http://opendata.hira.or.kr/> [accessed November 2016].
- Helbig, N., B. Vogel, H. Vogel, and F. Fiedler (2004) Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale, *Aerobiologia*, 3, 3-19.
- Jato, V., F.J. Rodríguez-Rajo, and M.J. Aira (2007) Use of *Quercus ilex* subsp. *ballota* phenological and pollen-production data for interpreting *Quercus* pollen curves, *Aerobiologia*, 23(2), 91-105.
- Käpylä, M. (1984) Diurnal variation of tree pollen in the air in Finland, *Grana*, 23(3), 167-176.
- KMA (Korea Meteorological Administration) (2016) <http://www.kma.go.kr/> [accessed November 2016].
- Kim, M.K. and S.W. Oh (1999) Change of causative inhalant allergens in respiratory allergic patients in Chungbuk district, *Allergy, Asthma & Immunology Research*, 19(5), 696-702. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.-S., W.-K. Lee, J.-H. Yoon, and C.-C. Song (2006) Distribution pattern of *pinus densiflora* and *quercus* spp. stand in Korea using spatial statistics and GIS, *Journal of Korean Forest Society*, 95(6), 663-671. (in Korean with English abstract)
- Lim, Y.-K., K.R. Kim, C. Cho, M. Kim, H. Choi, M.J. Han, I. Oh, and B. Kim (2015) Development of a oak pollen emission and transport modeling framework in South Korea, *Atmosphere*, 25(2), 221-233. (in Korean with English abstract)
- Mullins, J. and Emberlin, J. (1997) Sampling pollens, *Journal of Aerosol Science*, 28(3), 365-370.
- National Institute of Meteorological Research (2015) Development of applied biometeorology model (III): Meteorological characteristics analysis affected to high airborne oak pollen concentration and improvement of forecasting model. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Meteorological Research (2014) Advanced Research on Applied Meteorology (II) Advanced Research on Bio-Meteorology: improvement for pollen dispersion modeling system using WRF-CMAQ. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Meteorological Research (2013) Development of applied biometeorology model (I) Development of basic technology for pollen forecast system. (in Korean with English abstract)
- Norris-Hill, J. (1995) The modelling of daily Poaceae pollen concentrations, *Grana*, 34(3), 182-188.
- Oh, I., Y. Kim, K.-R. Choi, and J.H. Lee (2013) Relationship between Pollen Concentration and Meteorological,

- Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(6), 780-788. (in Korean with English abstract)
- Oh, I., Y. Kim, K.R. Choi, M. Suzuki, and J. Lee (2012) Pollen simulations in a coastal urban area of Ulsan, Korea: Preliminary results using WRF-CMAQ model, Proceeding of the 13th International Palynological Congress and 9th International Organization of Palaeobotany Conference, Tokyo, Japan, Paper No SS28-O05. 118.
- Oh, J.-W. (2009) Development of Pollen Concentration Prediction Models, Journal of the Korean Medical Association, 52(6), 579-591. (in Korean with English abstract)
- Oh, J.-W., I.J. Kang, S.W. Kim, M.H. Kook, B.S. Kim, J.T. Cheong, and H.B. Lee (2009a) The Association between the Concentration of Pollen and Outbreak of Pollinosis in Childhood, Allergy Asthma & Respiratory Disease, 19(1), 4-11. (in Korean with English abstract)
- Oh, J.-W. (2007) Characteristics of allergic pollen and the pollen amount was recently changed in Korea, Korean Journal of Asthma, Allergy and Clinical Immunology, 27(1), 1-7. (in Korean with English abstract)
- Oh, Y.-C. H.-A Kim, I.-J. Kang, J.-T. Cheong, S.-W. Kim, M.-H. Kook, B.-S. Kim, H.-B. Lee, and J.-W. Oh (2009b) Evaluation of the relationship between pollen count and the outbreak of allergic diseases, Allergy Asthma & Respiratory Disease, 19(4) 354-364. (in Korean with English abstract)
- Park, K.-J., H.-A. Kim, K.R. Kim, J.-W. Oh, S.-Y. Lee, and Y.-J. Choi (2008) Characteristics of Regional Distribution of Pollen Concentration in Korean Peninsula, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 10(4), 167-176. (in Korean with English abstract)
- Raynor, G.S., E.C. Ogden, and J.V. Hayes (1970) Dispersion and deposition of ragweed pollen from experimental sources, Journal of Applied Meteorology, 9(6), 885-895.
- Saito, H., M. Ohkubo, and J. Kunitomo (2006) Pollen production of a *Quercus phillyraeoides* stand in Shodoshima Island, Kagawa [in Japanese], Japanese Journal of Palynology, 52(1), 47-52.
- Schueler, S. and K.H. Schlunzen (2006) Modeling of oak pollen dispersal on the landscape level with a meso-scale atmospheric model, Environmental Modeling & Assessment, 11, 179-194.
- Siljamo, P., M. Sofiev, E. Filatova, Ł. Grewling, S. Jäger, E. Khoreva, and J. Kukkonen (2013) A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Model evaluation and sensitivity analysis, International Journal of Biometeorology, 57(1), 125-136.
- Singer, B.D., L.H. Ziska, D.A. Frenz, D.E. Gebhard, and J.G. Straka (2005) Research note: Increasing Amb a 1 content in common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) pollen as a function of rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, Functional Plant Biology, 32(7), 667-670.
- Sofiev, M., P. Siljamo, H. Ranta, and A. Rantio-Lehtimäki (2006) Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: theoretical considerations and a feasibility study, International Journal of Biometeorology, 50, 392-402.
- Sofiev, M. and K.-C. Bergmann (2013) Allergenic pollen: A review of the production, release, distribution and health impacts. Edited by L. Cecchi, 1<sup>st</sup> Ed., Springer Netherlands. 1-7.
- Sofiev, M., P. Siljamo, H. Ranta, T. Linkosalo, S. Jaeger, A. Rasmussen, A. Rantio-Lehtimäki, E. Severova, and J. Kukkonen (2013) A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Description of the emission module, International Journal of Biometeorology, 57, 45-58.
- Vogel, H., A. Pauling, and B. Vogel (2008) Numerical simulation of birch pollen dispersion with an operational weather forecast system, International Journal of Biometeorology, 52, 805-814.
- Zhang, R., T. Duhl, M.T. Salam, J.M. House, R.C. Flagan, E.L. Avol, F.D. Gilliland, A. Guenther, S.H. Chung, B.K. Lamb, and T.M. VanReken (2013) Development of a regional-scale pollen emission and transport modeling framework for investigating the impact of climate change on allergic airway disease, Biogeosciences Discuss, 10, 3977-4023.
- Zink, K., A. Pauling, M.W. Rotach, H. Vogel, P. Kaufmann, and B. Clot (2013) EMPOL 1.0: a new parameterization of pollen emission in numerical weather prediction models, Geoscientific Model Development, 6(6), 1961-1975.