

UM-CMAQ-Pollen 모델의 참나무 꽃가루 배출량 산정식 개선과 예측성능 평가

김태희 · 서윤암 · 김규랑* · 조창범 · 한매자
국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2018년 11월 1일, 수정일: 2019년 1월 4일, 게재확정일: 2019년 1월 7일)

Improvement and Evaluation of Emission Formulas in UM-CMAQ-Pollen Model

Tae-Hee Kim, Yun Am Seo, Kyu Rang Kim*, Changbum Cho, and Mae Ja Han

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research,
Korea Meteorological Administration, Jeju, Korea

(Manuscript received 1 November 2018; revised 4 January 2019; accepted 7 January 2019)

Abstract For the allergy patient who needs to know the situation about the extent of pollen risk, the National Institute of Meteorological Sciences developed a pollen forecasting system based on the Community Multiscale Air Quality Modeling (CMAQ). In the old system, pollen emission from the oak was estimated just based on the airborne concentration and meteorology factors, resulted in high uncertainty. For improving the quality of current pollen forecasting system, therefore the estimation of pollen emission is now corrected based on the observation of pollen emission at the oak forest to better reflect the real emission pattern. In this study, the performance of the previous (NIMS2014) and current (NIMS2016) model system was compared using observed oak pollen concentration. Daily pollen concentrations and emissions were simulated in pollen season 2016 and accuracy of onset and end of pollen season were evaluated. In the NIMS2014 model, pollen season was longer than actual pollen season; The simulated pollen season started 6 days earlier and finished 13.25 days later than the actual pollen season. The NIMS2016 model, however, the simulated pollen season started only 1.83 days later, and finished 0.25 days later than the actual pollen season, showing the improvement to predict the temporal range of pollen events. Also, the NIMS2016 model shows better performance for the prediction of pollen concentration, while there is a still large uncertainty to capture the maximum pollen concentration at the target site. Continuous efforts to correct these problems will be required in the future.

Key words: CMAQ, pollen forecast, Oak pollen, emission, pollen season

1. 서 론

꽃가루 알레르기 질환은 꽃가루의 항원 항체 반응으로 인해 알레르기성 비염, 결막염, 피부염 등을 발

생시키는 질환으로 알려져 있다(Lewis et al., 1983). 최근 기후변화의 영향으로 대기 중 이산화탄소의 농도가 증가하고 기온이 상승함에 따라 꽃가루에 대한 노출이 점차 증가하여 알레르기에 의한 피해가 증가하고 있다(Beggs, 2010; Kim and Yoon, 2011). 꽃가루 알레르기는 여러 종류의 약물치료 및 면역치료법 등이 개발되어 있지만 직접적인 원인 물질인 꽃가루의 노출을 피하는 것이 가장 근본적인 치료방법이다. 따라서 꽃가루가 비산하는 시기와 양을 예측 한다면

*Corresponding Author: Kyu Rang Kim, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration, 33 Seohobuk-ro, Jeju-do 63568, Korea. Phone: +82-64-780-6753, Fax: +82-64-738-6515 E-mail: krk9@kma.go.kr

노출을 피해 알레르기 증상을 최소화시킬 수 있다(Kim and Kim, 2016).

꽃가루의 노출을 최소화 하려는 노력은 국내외에서 다양하게 진행되고 있다. 국외에서는 수치예보모델을 활용한 다양한 연구가 진행되고 있다(Helbig et al., 2004; Sofiev et al., 2013). 라그랑지안 모델이나 오일 리리안 모델을 기반으로 대기질모델과 수송모델이 결합된 다양한 모델들이 개발되어 수치예보의 연구가 진행되고 있으며(Efstathiou et al., 2011; Siljamo et al., 2013; Sofiev et al., 2013, 2015; Zhang et al., 2013) 이러한 연구들을 바탕으로 꽃가루의 시·공간적인 변화를 예보하는 서비스들이 운영되고 있다.

국내의 경우 꽃가루 모니터링과 모델을 활용한 예보 등 다양한 연구가 진행중이다. 국립기상과학원에서는 지속적으로 꽃가루를 모니터링하고 있으며 관측된 꽃가루 농도와 기상자료를 활용한 예측 모델을 개발하여 국내의 실정에 맞는 꽃가루 알레르기 위험도 예보 서비스를 제공 중이다(Park et al., 2008; Oh, 2009; Kim et al., 2012; Lim et al., 2015). 알레르기를 유발하는 다양한 꽃가루들 중에서도 Hong (2015)의 연구에 따르면 국내에서 유병률이 가장 높은 수종은 참나무로 나타났다. 따라서 선행연구에서는 유병률이 가장 높은 참나무 꽃가루 알레르기에 대한 피해를 줄이기 위해 모델을 개발하여 꽃가루의 농도를 예측하는 연구를 진행하였다. Lim et al. (2015)는 로버스트 다중회귀식을 활용하여 일별 꽃가루 배출량을 산정하고 광화학 확산예측모델 Community Multiscale Air Quality Modeling (CMAQ)에 배출량을 계산하는 과정을 추가, 수정하여 대기 중 꽃가루 농도를 모의한 연구를 수행한 바 있다. 그러나 배출량을 산정할 때 꽃가루의 생산량 자료가 아닌 농도자료를 이용하여 배출량을 추정하였기 때문에 실제 참나무의 생물학적인 거동을 고려하지 못하는 한계점이 나타났다. 생물학적인 거동을 모의할 수 있는 새로운 배출량 산정식을 개발하기 위해 본 연구에서는 참나무 순림지역에 생태타워를 설치해 직접 꽃가루 생산량을 관측하여 생성 특성을 분석하였다. 2년간의 관측을 통해 실제 참나무의 생물학적 특성을 재현할 수 있는 모델을 개발하고자 연구를 진행하였다. 참나무의 비산시기를 관측된 자료와 비교하고 통계분석을 통해 모델을 평가하였으며 모델의 개선방향을 살펴 보았다.

2. 연구방법

2.1 UM-CMAQ-Pollen 모델링 체계

Lim et al. (2015)의 연구에서는 기상 입력자료로 UK Met office's Unified Model Local Data Assimilation

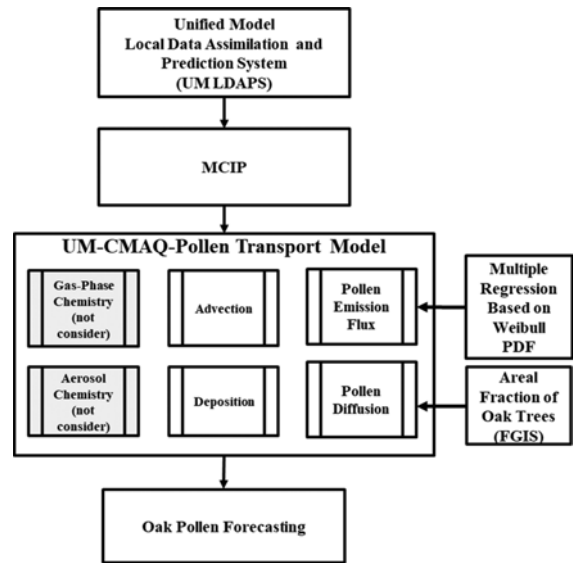


Fig. 1. Flowchart of the UM-CMAQ-Pollen modeling framework.

and Prediction System (UM-LDAPS)를 사용하고 미국 Environmental Protection Agency (EPA)에서 개발된 3차원 광화학 모델인 CMAQ (Byun and Ching, 1999)을 이용하여 일별 꽃가루 배출량 산정식을 CMAQ 모델의 메인 프로그램 과정에 추가한 꽃가루 확산예측 모델(UM-CMAQ-Pollen)을 개발하였다.

CMAQ 모델은 광해리율을 계산하는 Photolysis rate processor (JPROC)와 초기조건과 경계조건을 생성하는 Initial conditions processor (ICON), Boundary condition processor (BCON) 등의 전처리 프로그램과 CMAQ Chemical Transport Model (CCTM)으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 꽃가루를 비반응성 물질로 가정하고 에어로졸 중 조대입자(coarse particle)로 처리하여 CCTM 과정에서 화학적 반응을 고려하지 않도록 하였고 배출량 입력자료 처리 및 배출량 산정모듈을 추가하여 시간 별 배출량이 계산되도록 수정하였다(Fig. 1). 계산된 시간별 배출량에 참나무의 면적 비율을 곱하여 격자별 입력자료로 사용되며, CCTM 프로세서의 확산, 침적 과정을 거쳐 시·공간적인 꽃가루의 농도를 계산하였다.

꽃가루의 침적 과정에서 중요한 변수로 작용하는 입자의 광학직경은 직접 관측한 참나무 꽃가루의 평균 광학직경인 $29 \mu\text{m}$ 을 적용하였고, 밀도는 1058 kg m^{-3} (Schueler and Schlunzen, 2006)가 고려되었다. 모델의 격자체계는 수평해상도를 1.5 km 로 가지는 358×439 격자, 모델의 최하층은 0.9987 시그마 레벨로 고도 약 39 m , 연직 24 층으로 구성되었다(Table 1).

Table 1. Description of the UM-CMAQ-Pollen model.

	Specification	Description
Model characteristics	Input data	KMA UM LDAPS
	Horizontal grid and resolution	Horizontal 1.5 km, 358 × 439
	Vertical layers	24 layers
	Layer top limit	15271.7 m
	Forest type information	Forest Geographic Information System (FGIS) Data base, Korea Forest Service (KFS)
Physics and Properties	Mean diameter	29 μm
	Pollen density	1,058 kg m ⁻³ , Schueler and Schlünzen (2006)
	Settling velocity	0.029 m s ⁻¹ , Jackson and Lyford (1999)

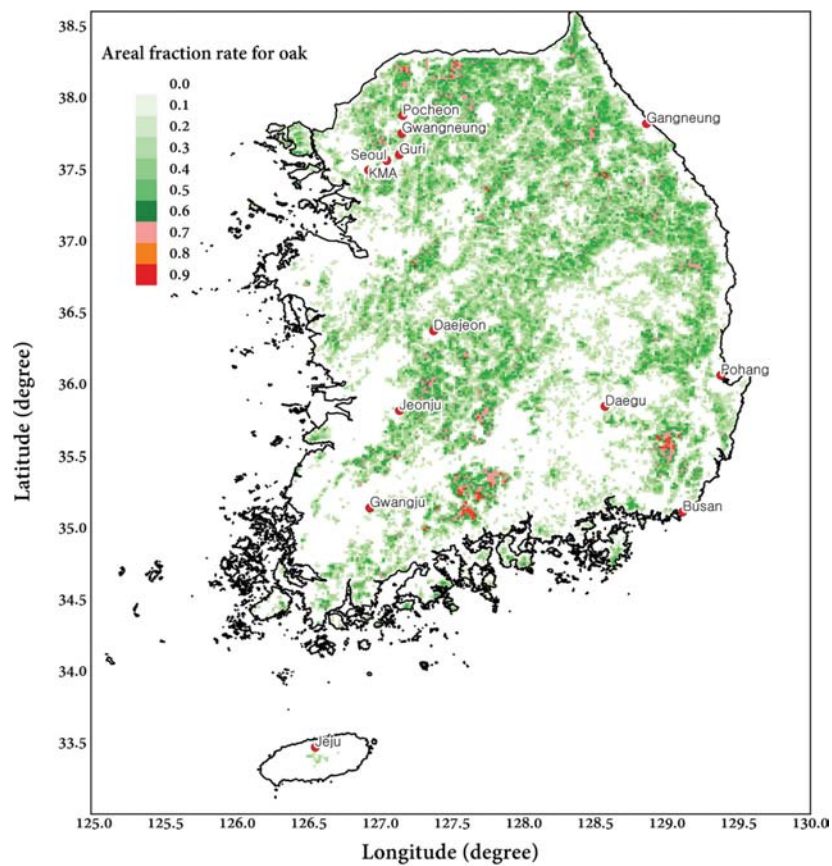


Fig. 2. Distribution of areal fraction of oak trees based on the FGIS (Forest Geographic Information System) data from the Korea Forest Service. Red Circles indicate the pollen observation network.

2.2 꽃가루 배출원 입력자료

신뢰성 있는 꽃가루 예보를 위해서는 배출원에 해당하는 수목류에 대한 상세한 정보가 필요하다(Pauling et al., 2012; Zink et al., 2013; Hernandez-Ceballos et al., 2014). 다양한 연구에서 수목류의 정보를 식생의 면적과 지표이용자료 등을 이용하여 수치모델의 배출

원 자료로서 사용하고 있다(Maya-Manzano et al., 2016; Zink et al., 2017). 본 연구에서는 산림청 공간정보시스템에서 제공하는 FGIS 임상도 자료(1:5000)를 이용하여 참나무 수목류에 해당하는 상수리나무, 신갈나무, 굴참나무, 기타 참나무류의 면적비율을 모델의 격자에 맞도록 공간 할당하여 격자별 참나무의 면적을

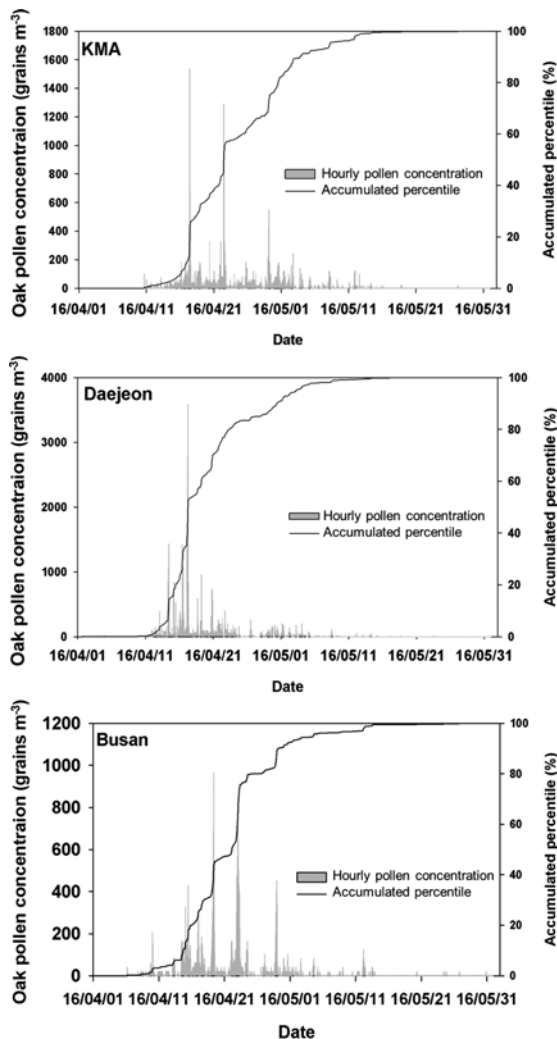


Fig. 3. Hourly observed oak pollen counts and accumulated percentile during April-May 2016 for KMA, Daejeon and Busan.

구하고 배출원으로 적용하였다(Fig. 2).

2.3 사례기간 선정

국내의 꽃가루 관측은 서울, 대전, 대구, 부산, 제주, 등 12개소 지점에서 버카드 샘플러(Burkard 7-day recording volumetric spore sampler) (Burkard, 2015)를 이용하여 농도 관측을 시행 중이다. 서울, 대전, 부산 지점은 시간별 꽃가루 농도를 관측하고 있으며 이를 사례기간 선정 및 모델 검증에 사용하였다. 본 연구에서는 2016년의 꽃가루가 본격적으로 날리는 시기를 비산시기로 선정하여 관측된 데이터와 모델의 결과를 비교분석 하였다. 비산시기의 선정은 Sofiev et al.

Table 2. Correlation between meteorological factors and pollen dispersal.

	<i>r</i>	<i>p</i>	<i>N</i>
Accumulation temperature (K)	-0.36	0.0002	101
Mean wind speed (m s^{-1})	0.03	0.746	101
Mean temperature (K)	-0.14	0.156	101
Daily total rain (mm)	-0.07	0.482	101
Minimum temperature (K)	-0.13	0.210	101
Maximum temperature (K)	-0.045	0.623	101

(2015)의 연구에서 제안한 전체 꽃가루 누적농도가 5%인 기간을 시작일로 결정하고 95% 배출된 날을 종료일로 정의하여 결정하였다.

2016년 시간 별 관측 자료가 존재하는 서울, 대전, 부산의 꽃가루 농도(grains m^{-3})를 Fig. 3에 나타내었다. 서울 기상청지점의 꽃가루는 4월 15일부터 배출되며 5월 8일 95%가 나타나 비산시기가 22일간 지속되었다. 대전은 4월 13일 시작되어 5월 3일 종료되어 20일간 지속되었다. 부산은 4월 13일 발생하여 5월 4일 종료되었다. 남쪽에 위치할수록 비산시기가 빠른 경향이 나타났는데 이는 남쪽의 높은 온도로 일찍 개화했기 때문으로 판단된다.

2.4 꽃가루 배출량 산정

수치모델을 통해 꽃가루를 모의할 때 꽃가루의 배출량은 산림이나 초목의 형태가 일정하지 않고 그 분포를 정확한 수치로 나타내기 어렵기 때문에 기상학적 요소로 배출량을 추정하게 된다(Oh et al., 2017). Lim et al. (2015)의 연구에서는 배출량을 산정하기 위해 풍속, 기온, 상대습도, 날짜 등의 다양한 기상요소들과 원격지 관측 농도를 이용하여 꽃가루를 추정하는 배출량 산정식(이하 NIMS2014)을 개발하였다. 그러나 대기의 농도와 실제 꽃이 개화하여 생성되는 꽃가루의 양과는 다른 개념이기 때문에 시간이 지날수록 절대량이 감소하는 현상을 모의하지 못하는 불확실성을 보였다. 꽃가루 예보의 신뢰성 향상을 위해 배출량 산정 방식에 대한 불확실성을 개선하고 현실의 꽃가루 발생특성을 모의할 수 있는 새로운 배출량 산정법이 요구됨에 따라, 본 연구에서는 경기도 포천시에 위치한 국립수목원내 광릉숲(북위 $37^{\circ}45'25.37''$, 동경 $127^{\circ}9'11.62''$)에 생태타워를 설치하여 꽃가루를 직접 관측하고 실제 참나무 꽃가루의 발생특성을 고려한 새로운 배출량 산정식을 개발하였다.

새로운 배출량 산정을 위해 생태타워 주변 광릉 활엽수림 타워(GDK, Korea Flux Monitoring Network)의 기상관측 자료와 꽃가루 생산량의 상관관계를 확인하였다(Table 2). 상관관계 분석결과 꽃가루 생산량

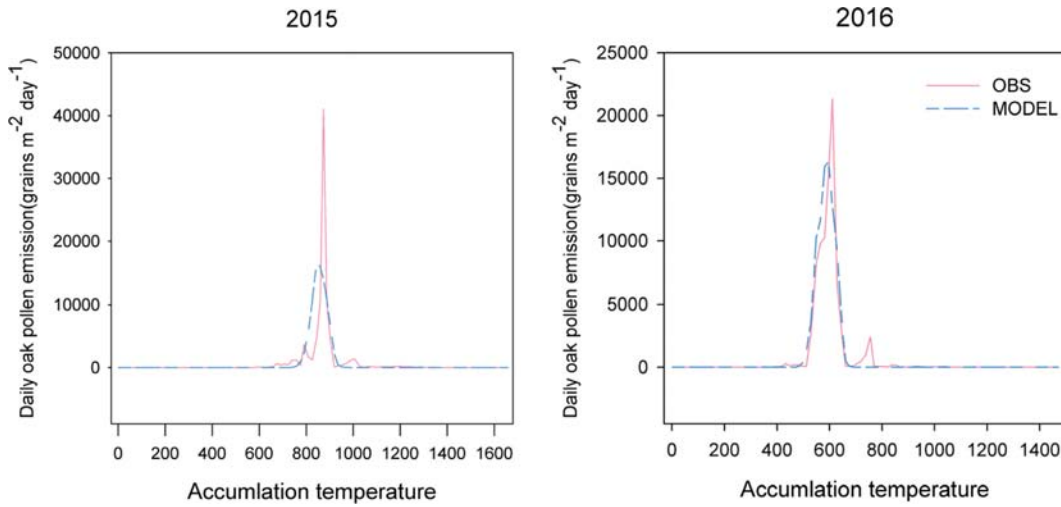


Fig. 4. Weibull distribution curve fitting to daily oak pollen emission in 2015 (left) and 2016 (right).

과 가장 상관성이 높은 것은 적산온도로 나타났기 때문에 적산온도와 꽃가루의 생성패턴에 최적화된 fitting curve를 구하였다(Fig. 4). 최적화된 fitting curve는 와이블 확률 밀도 함수식(식1)으로 꽃가루 생성패턴에 최적화된 모수값을 추정하였다.

$$f(x) = \frac{c}{\sigma} \left(\frac{x - \theta}{\sigma} \right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x - \theta}{\sigma} \right)^c} \quad (1)$$

for $x \geq 0, c \geq 0$, and $\sigma > 0$

여기서, σ 는 함수의 척도(scale)를 결정하는 모수이며, c 는 함수의 모양(shape)을 결정하는 모수, θ 는 위치(location)를 결정하는 모수다.

일별 꽃가루 배출량은 실제 측정된 꽃가루 생산량의 수준에 맞추어 2015년, 2016년 비산시기 동안 관측된 평균 꽃가루 양인 85000 grain을 곱하여 일별 꽃가루 배출량을 계산하는 새로운 배출량 산정식(식2)을 개발하였다(이하 NIMS2016).

$$\begin{aligned} \text{Daily pollen emission} \left(\frac{\text{grains/m}^2}{\text{day}} \right) &= 85000 \\ &\times \left\{ \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{acc - \theta}{\sigma} \right)^c \right] \right) \right. \\ &\left. - \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{acc - 1}{\sigma} \right)^c \right] \right) \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

여기서 acc 는 당일의 적산온도, $acc - 1$ 은 전날의 적산온도, σ, c, θ 는 식(1)에서 구해진 와이블 모수이다. 적산온도는 전국의 AWS에서 매일 관측되는 기온

을 이용하여 모델의 격자 해상도에 맞도록 Lee et al. (2012)가 제안한 지형을 고려한 기온 객관분석을 통해 매일의 적산온도를 구한다.

개발된 배출량 산정식의 성능 평가를 위해 오차를 나타내는 통계지표인 Mean Bias (MB)와 Root Mean Square Error (RMSE) 그리고 일치도를 나타내는 Index of Agreement (IOA)를 근거로 모델이 어느 정도의 오차를 가지고 있는지 통계분석 하였다. MB와 RMSE는 0에 가까울수록 모델이 관측 값을 유사하게 모의하고 양의 값이면 과대모의 음의 값이면 과소모의 함을 의미한다. IOA는 1에 가까울수록 모델의 결과와 관측값이 일치하는 것을 의미한다. 또한 기존 산정식과 개선된 산정식의 생성패턴 비교를 위해 배출량의 공간분포를 비교하였다.

3. 연구결과

3.1 배출량 검증

선행연구에서 꽃가루 배출량 산정식으로 사용된 NIMS2014와 직접적인 꽃가루 생성패턴 관측을 통해 개발된 NIMS2016의 성능평가를 위해 관측된 일별 꽃가루 데이터와 비교하였다(Fig. 5). 기상청 지점의 결과 NIMS2014는 모의기간 동안 지속적으로 발생함을 보였고 실제 꽃가루가 단기간 발생하고 종료되는 패턴을 모의하지 못하고 있다. 반면 NIMS2016은 실제 생성시작일과 매우 유사하게 배출이 시작되었으며 실제 비산종료일보다 일찍 종료되었다. 상관 분석결과 NIMS2014는 $r = 0.34$ 를 보였으나 NIMS2016은 $r = 0.52$ 로 상관도가 개선되었다. 대전의 경우도 NIMS2014는 실제 꽃가루 발생시기보다 길게 모의하고 있으며

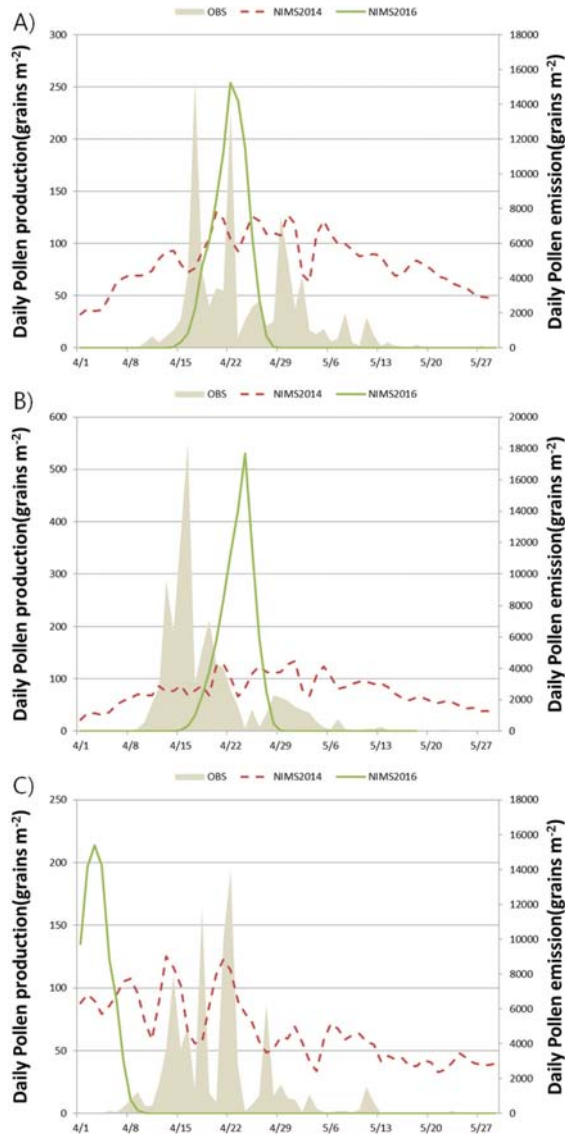


Fig. 5. Comparison between daily oak pollen production and daily oak pollen emission (A: KMA, B: Daejeon, C: Busan).

NIMS2016은 실제 꽃가루와 유사한 패턴을 보였다. 상관 분석결과 NIMS2014는 $r=0.19$, NIMS2016은 $r=0.34$ 로 높은 모의성능을 보이지는 못하였다.

부산지역의 상관분석결과 NIMS2014는 $r=0.43$, NIMS2016은 $r=0.14$ 를 보이며 NIMS2016이 더 낮은 상관성을 보였다. 부산의 모의성능이 낮은 이유를 분석하기 위해 꽃가루를 관측한 광릉지역과 서울, 대전, 부산 관측소 주변 참나무의 분포를 비교하였다(Fig. 6). 부산은 남쪽에 위치하여 기온이 다른 관측지점보다 높기 때문에 NIMS2016의 개화시기는 빨리 나타

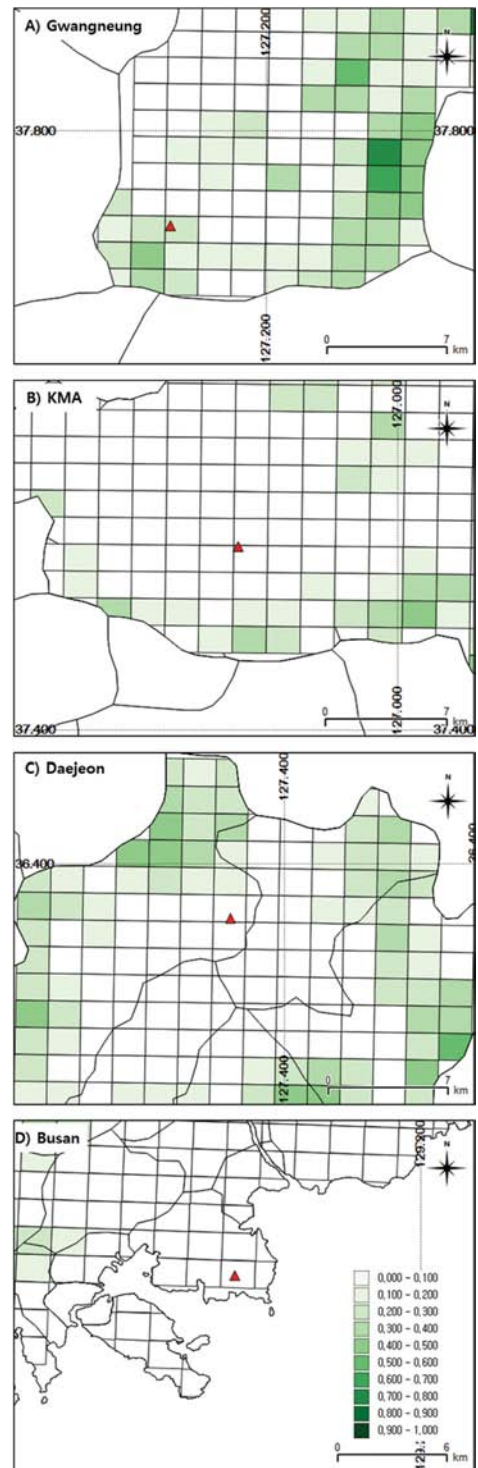


Fig. 6. Distribution of areal fraction of oak trees in around observation stations. The red triangle indicate the location of observation station.

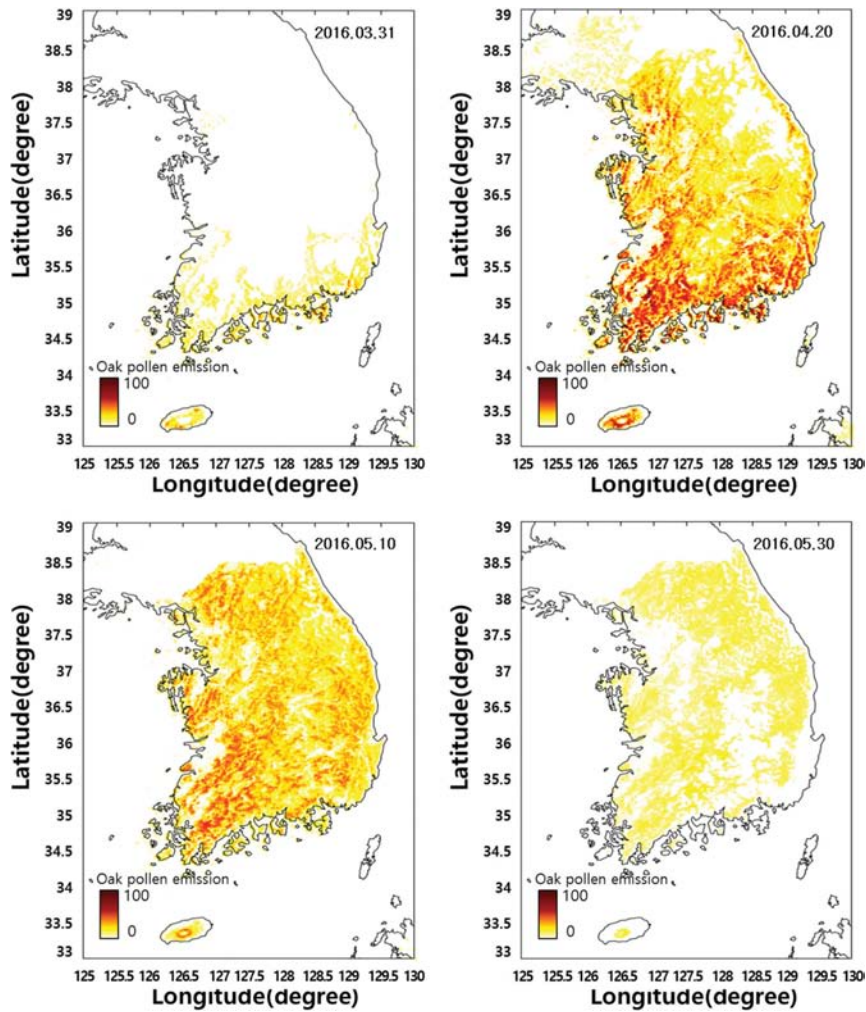


Fig. 7. National distribution of oak pollen by NIMS2014 emission formulas on 31 March, 20 April, 10 May, 30 May 2016.

났지만 주변에는 참나무가 없어 관측된 꽃가루는 원격에서 발생한 꽃가루가 측정되어 모델의 배출시기와 실제 배출시각간의 시간차가 발생하여 오차가 발생한 것으로 분석된다.

3.2 배출량의 공간분포 비교

배출량 산정식 변경으로 인한 산정식별 꽃가루가 생성되는 시기를 알아보기 위해 꽃가루가 발생하기 시작하는 3월 31일과 생산이 절정에 달하는 4월 20일, 비산이 종료되는 5월 10일, 그리고 꽃가루 시즌이 완전히 종료된 후인 5월 30일의 전국의 꽃가루 공간 분포를 비교하였다(Figs. 7, 8). NIMS2014는 꽃가루가 지속적으로 발생하기 때문에 전국적으로 발생하고 있으며 실제 꽃가루의 관측이 종료된 후에도 전국적으

로 발생하고 있다. 반면 NIMS2016은 온도의 영향으로 따뜻한 남쪽부터 꽃가루가 생성되어 점차 북상하는 현상을 보이며 관측이 종료되는 5월 10일 이후에는 고도가 높은 산간지역을 제외하고는 대부분의 배출이 종료되는 특성을 보였다.

3.3 UM-CMAQ-Pollen 모델 수행 결과

참나무 꽃가루 확산 예측시스템을 이용하여 서울, 부산, 대전의 비산시기를 고려한 4월 10일부터 5월 10일까지의 대기 중 꽃가루의 농도를 예측하고 관측된 농도와 비교하였다(Fig. 9, Table 3).

서울 기상청지점의 관측 꽃가루는 크게 두 번의 고농도를 보였고 4월 17일(218.28 grains m⁻³), 4월 22일(194.31 grains m⁻³)로 나타났다. NIMS2014는 4월 17

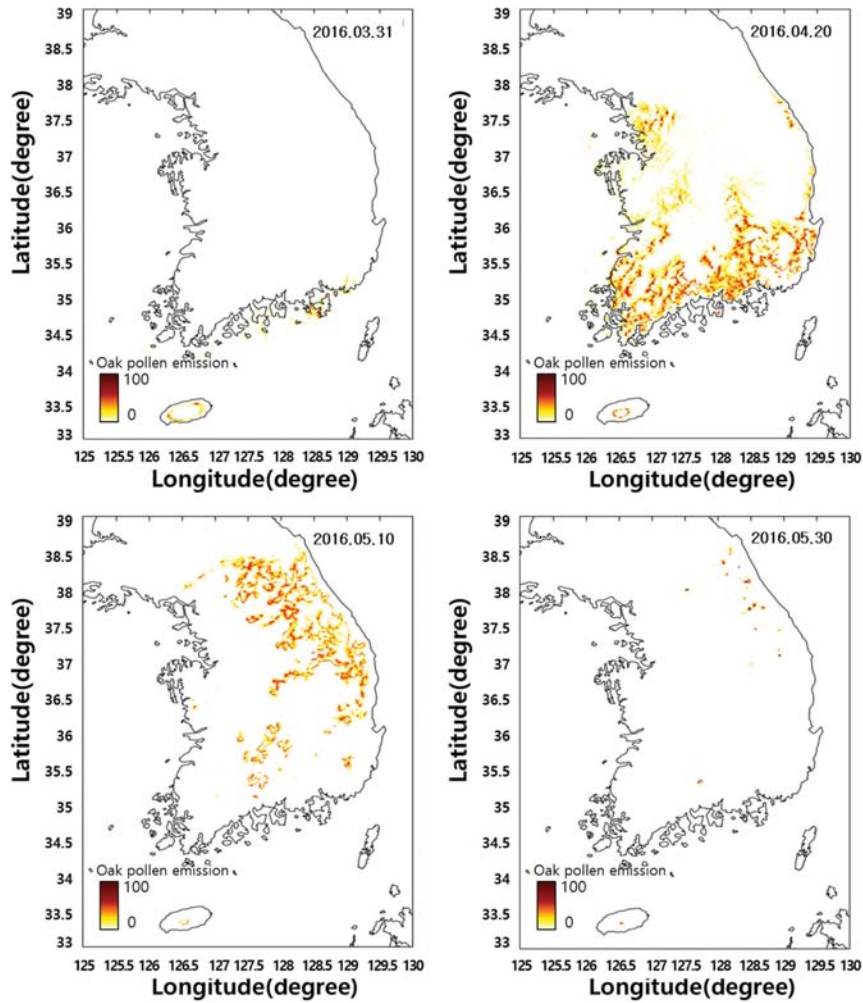


Fig. 8. National distribution of oak pollen by NIMS2016 emission formulas on 31 March, 20 April, 10 May, 30 May 2016.

Table 3. Statistical analysis of pollen concentration during 10 April~10 May 2016.

Site name	NIMS2014			NIMS2016		
	RMSE	MB	IOA	RMSE	MB	IOA
KMA	74.24	37.72	0.59	76.81	25.26	0.62
Daejeon	269.93	150.28	0.28	361.24	137.14	0.06
Busan	80.29	13.99	0.29	46.00	-18.47	0.47
Daegu	89.47	54.31	0.41	55.11	25.73	0.42
Gwangju	67.34	-13.95	0.30	57.30	-22.52	0.52
Gangneung	260.01	194.90	0.10	90.77	60.5	0.26
Guri	141.03	72.44	0.18	182.68	81.19	0.38
Jeonju	231.06	116.65	0.33	227.65	114.26	0.28
Jeju	59.26	28.85	0.14	32.64	13.94	0.13
Pocheon	117.90	43.27	0.43	275.48	114.65	0.19
Pohang	348.18	225.48	0.10	152.15	84.24	0.15
Seoul	85.20	54.31	0.41	112.23	46.82	0.06

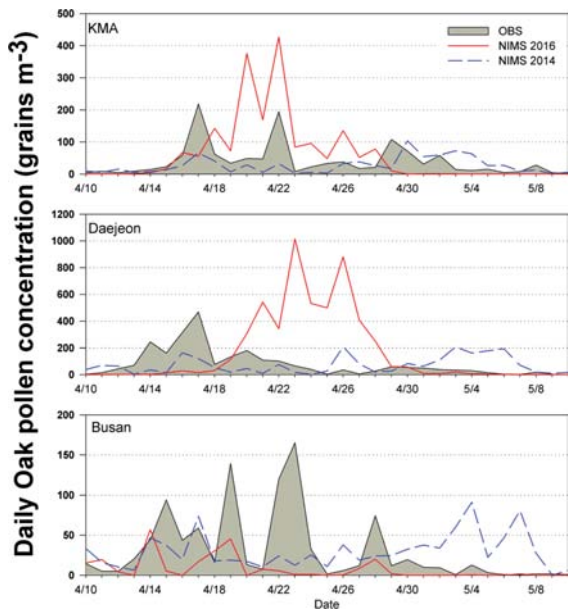


Fig. 9. Comparison of daily oak pollen concentration during the flowering season of 2016 at KMA, Daejeon and Busan.

일 4월 22일 모두 하루 빠르게 고농도를 모의하였으나 꽃가루가 지속적으로 발생하여 4월 29일 이후 과대평가하였다. NIMS2016은 17일, 22일의 꽃가루를 모의하고 있으며 유사한 경향을 보였다. 기상청 지점의 통계지표를 분석한 결과 NIMS2014는 MB = 37.72, RMSE = 74.24, IOA = 0.59로 나타났다. NIMS2016은 MB = 25.26, RMSE = 76.81, IOA = 0.62로 NIMS2014과 유사한 성능을 보였다.

대전지점에서 관측 꽃가루는 4월 17일 469.94 grains m⁻³의 최대 농도를 보이고 이후 급격하게 농도가 낮아지는 경향을 보였다. NIMS2014는 배출이 거의 종료된 4월 23일 이후도 지속적으로 발생하는 것으로 모의하였고 MB = 150.28, RMSE = 269.93, IOA = 0.28로 낮은 성능을 보였다. NIMS2016 모델의 결과는 MB = 137.14, RMSE = 361.24, IOA = 0.06로 NIMS2014보다 낮은 예측성능을 보였다. 대전지점의 NIMS2016의 꽃가루 발생일은 크게 지연되어 나타났다. 지연의 원인은 두 가지로 생각할 수 있다. 첫 번째로 NIMS2016의 배출량이 발생한 시기(Fig. 5b)보다 꽃가루의 농도가 발생한 시기(Fig. 9)가 더 늦게 발생하였는데 이는 모델에서 대전관측지점의 기온이 꽃가루를 생성할 수

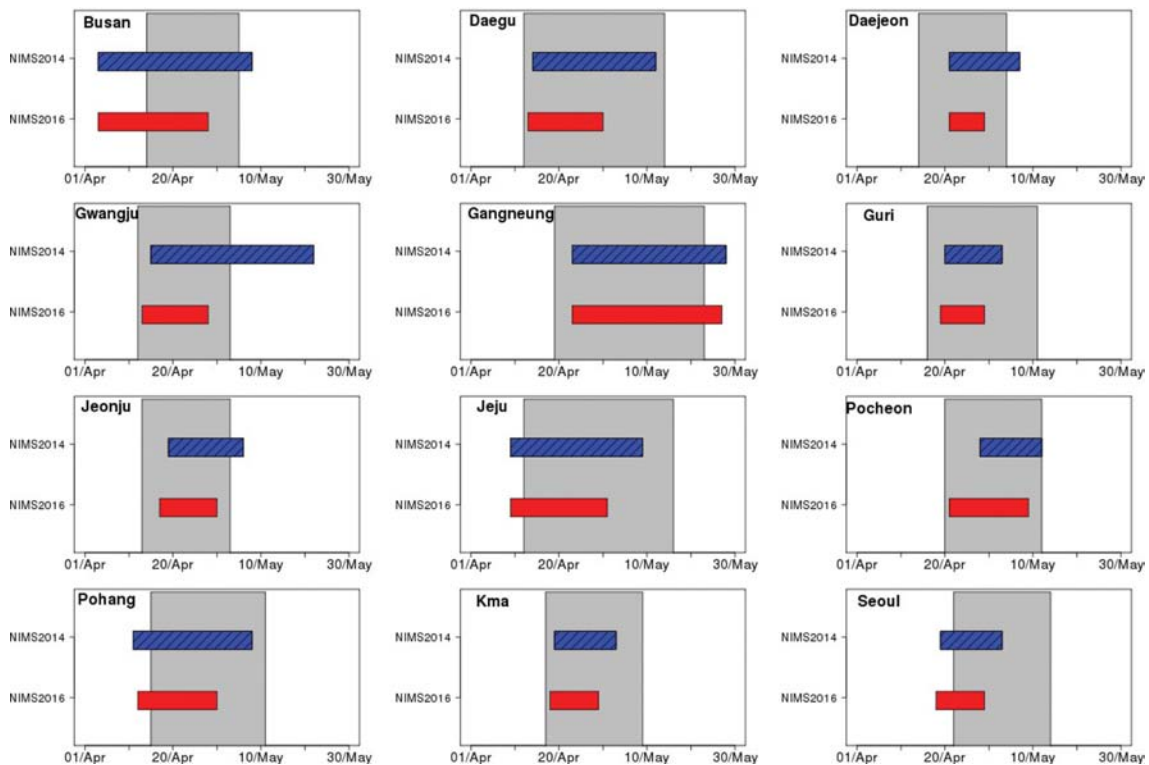


Fig. 10. Onset (date of 5% of the cumulative season total) and end (date of 95% the cumulative season total) of the 2016 pollen season (observation: gray bar, NIMS2014: blue bar, NIMS2016: red bar).

Table 4. Differences between simulated and observed onset and end of oak pollen season (day).

	NIMS2014		NIMS2016	
	Onset day	End day	Onset day	End day
KMA	-6	13	2	-6
Daejeon	-3	19	7	3
Busan	-8	12	-11	3
Daegu	-2	12	2	-3
Gwangju	-4	21	4	19
Gangneung	-10	6	4	6
Guri	-7	13	4	-7
Jeonju	0	18	7	4
Jeju	-4	6	-1	-3
Pocheon	-9	14	9	0
Pohang	-6	16	-3	-3
Seoul	-13	9	-2	-10
Average	-6.00	13.25	1.83	0.25

있는 충분한 온도로 판단하여 생성됨을 계산하였지만 관측지점에 해당하는 격자(Fig. 6c)에는 참나무가 거의 존재하지 않아 배출량이 낮게 계산되어 농도는 나타나지 않고 배출이 종료된 후 다른 지점에서 발생한 꽃가루가 이루어져 나타난 것으로 판단된다. 두 번째로 생산량을 측정할 국립수목원의 참나무 수종(졸참나무)과 대전 관측소 주변 지역의 참나무의 수종의 차이로 꽃가루가 생성되는 시기가 달라 오차가 발생한 것으로 사료된다.

부산의 경우 NIMS2016 모델은 농도를 낮게 모의하는 경향이 나타났는데 이는 부산관측소 주변 배출원이 거의 존재하지 않기 때문에 다른 지점에 비해 꽃가루의 농도가 낮은 것으로 판단된다(Fig. 6d). NIMS2014는 MB = 13.99, RMSE = 80.29, IOA = 0.29으로 꽃가루 농도를 예측하지 못하였고, NIMS2016은 MB = -18.47, RMSE = 46.00, IOA = 0.47로 개선되었다.

3.4 꽃가루 발생특성 비교

UM-CMAQ-Pollen시스템의 꽃가루 비산시기의 예측성능 평가를 위해서 모델의 비산시기와 관측된 비산시기를 정량적으로 비교하였다. Figure 10은 국내 12개 꽃가루 관측지점의 비산시기 시작일과 종료일을 나타낸 그림이다. 참나무의 발아는 온도의 영향을 받기 때문에 온도가 높은 남쪽부터 비산시작일이 빠르게 시작되는 것으로 나타났으며 실제 비산시기는 평균 4월 15일에 시작되어 5월 9일 종료되었고 23일 가량 지속되었다. 평균 비산시작일과 종료일을 비교하였을 때 NIMS2014는 실제 참나무의 개화시기보다 평균 6.00일 빨리 나타났다. 또한 NIMS2014는 비산시기가 길게 지속되는 경향이 있기 때문에 실제 비산시기보다 13.25일 더 늦게 종료되는 것으로 모의하였다.

반면 NIMS2016은 비산시기의 시작일이 1.83일로 약간 늦은 경향을 보였지만 종료일은 0.25일의 차이를 보이며 꽃가루 비산시기에 대한 예측성능이 향상되었다(Table 4). 대부분의 지역에서 비산 시작일에 대한 예측이 잘되었으나 NIMS2016의 부산과 대전은 특히 오차가 큰데 이는 참나무의 생성량 관측을 실시한 국립수목원의 참나무 수종과 부산, 대전 관측지 주변 참나무 종의 차이로 인한 것과 관측소 주변 참나무 분포가 적어 원거리 이동 꽃가루의 관측으로 인한 비산시기 오차가 원인으로 사료된다.

4. 요약 및 결론

이 연구에서는 국내에서 가장 피부 감작률이 높은 참나무 꽃가루를 예측하는 UM-CMAQ-Pollen 시스템의 기존 NIMS2014 배출량 모델과 관측 꽃가루자료를 기반으로 수정된 NIMS2016 배출량 모델을 비교하였다. 각 모델의 결과는 2016년 봄철 서울, 대전, 부산지역에서 비산시기 동안 관측된 농도와 비교하여 예측성능을 평가하였다.

생태타워를 설치하여 관측한 결과 단기간 동안 많은 양이 생성되는 생물학적 특성을 보였다. NIMS2014는 배출량을 산정할 때 꽃가루의 농도를 입력자료로 사용하여 평균적인 거동을 따르기 때문에 짧은 시간 집중되어 발생하는 꽃가루를 모의하지 못하는 모습을 보였다. NIMS2016은 실제 참나무의 생물학적 특성을 고려하여 배출량 산정식을 만들었으나 전체 꽃가루의 배출 패턴을 모사하지 못하는 한계를 보였다. 이는 적산온도라는 단일변수만으로는 꽃가루의 배출 패턴을 명확하게 설명하지 못하여 발생한 한계로 해석된다. 그러나 꽃가루가 발생하는 시기를 유사하게 모의하게

되었고, NIMS2014의 시간이 지날수록 꽃가루의 절대량이 감소하지 않고 지속적으로 발생하는 문제점을 해결하였다. NIMS2016의 꽃가루를 모의함에 있어 발생하는 한계점을 해결하기 위해서는 향후 다년간의 꽃가루 관측이 필요하며 기후요소가 꽃가루의 생성에 미치는 영향을 분석하여 전체 꽃가루의 생성특성을 모사할 수 있는 변수를 선정하는 것이 필요하다. 또한 참나무 수종에 따른 꽃가루 생성 시기 변화를 설명하기 위한 수종별 꽃가루 비산시기의 분석과 지역별 상세한 참나무 수종 지도가 필요할 것으로 사료된다. 꽃가루를 예측하는데 있어 생물학적 특성을 이해하고 배출량의 정확성을 증진시키기 위한 연구를 수행하였으며, 개선된 확산예측모델은 시간적인 예측성능의 향상되었다. 비산시기에 대한 정확성이 증가하여 발생시작일을 미리 알리는 것으로 봄철 환자들의 노출을 최소화하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국립기상과학원 연구개발사업 “기상업무 지원기술개발연구”의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Beggs, P. J., 2010: Adaptation to impacts of Climate Change on Aeroallergens and Allergic Respiratory Diseases. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **7**, 3006-3021, doi:10.3390/ijerph7083006.
- Burkard, 2015: 7-day recording volumetric spore trap [Available online at http://www.burkardscientific.co.uk/agronomics/hirst_spore_sampler.htm].
- Byun, D. W. and J. K. S. Ching, 1999: Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. EPA/600/R-99/030 (NTIS PB2000-100561), 757 pp.
- Efstathiou, C., S. Isukapalli, and P. Georgopoulos, 2011: A mechanistic modeling system for estimating large-scale emissions and transport of pollen and co-allergens. *Atmos. Environ.*, **45**, 2260-2276, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.12.008.
- Helbig, N., B. Vogel, H. Vogel, and F. Fiedler, 2004: Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. *Aerobiologia*, **20**, 3-19.
- Hernandez-Ceballos, M. A., J. Soares, H. Garcia-Mozo, M. Sofiev, J. P. Bolivar, and C. Galan, 2014: Analysis of atmospheric dispersion of olive pollen in southern Spain using SILAM and HYSPLIT models. *Aerobiologia*, **30**, 239-255, doi:10.1007/s10453-013-9324-0.
- Hong, C.-S., 2015: Pollen allergy plants in Korea. *Allergy Asthma Respir. Dis.*, **3**, 239-254, doi:10.4168/aard.2015.3.4.239.
- Jackson, S. T., and M. E. Lyford, 1999: Pollen dispersal models in quaternary plant ecology: assumptions, parameters, and prescriptions. *Bot. Rev.*, **65**, 39-75, doi:10.1007/BF02856557.
- Kim, H. K., and T. H. Kim, 2016: Current trends in treatment of allergic rhinitis. *J. Korean Med. Assoc.*, **59**, 300-308, doi:10.5124/jkma.2016.59.4.300.
- Kim, K. R., K.-J. Park, H.-R. Lee, M. Kim, Y.-J. Choi, and J.-W. Oh, 2012: Development and Evaluation of the Forecast Models for Daily Pollen Allergy. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, **14**, 265-268, doi:10.5532/KJAFM.2012.14.4.265 (in Korean with English abstract).
- Kim, S.-H., and H. J. Yoon, 2011: Climate change and respiratory allergic diseases. *J. Korean Med. Assoc.*, **54**, 161-168, doi: 10.5124/jkma.2011.54.2.161.
- Lee, J. S., Y. H. Lee, J. C. Ha, and H. C. Lee, 2012: Objective analysis of temperature using the elevation-dependent weighting function. *Atmosphere*, **22**, 233-243 (in Korean with English abstract).
- Lewis, W. H., P. Vinay, and V. E. Zenger, 1983: *Airborne and allergenic pollen of north America*. The Johns Hopkins University Press, 288 pp.
- Lim, Y. K., K. R. Kim, C. Cho, M. Kim, H. S. Choi, M. J. Han, I. Oh, and B.-J. Kim, 2015: Development of a Oak Pollen Emission and Transport Modeling Framework in South Korea. *Atmosphere*, **25**, 221-233 (in Korean with English abstract).
- Maya-Manzano, J. M., S. Fernandez-Rodriguez, M. Smith, R. Tormo-Molina, A. M. Reynolds, I. Silva-Palacios, A. Gonzalo-Garijo, and M. Sadys, 2016: Airborne Quercus pollen in SW Spain: Identifying favourable conditions for atmospheric transport and potential source areas. *Sci. Total Environ.*, **571**, 1037-1047, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.094.
- Oh, I., K. R. Kim, J.-H. Bang, Y.-K. Lim, C. Cho, J.-W. Oh, Y. Kim, and M.-K. Hwang, 2017: A High-resolution Numerical Simulation and Evaluation of Oak Pollen Dispersion Using the CMAQ-pollen Model. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **33**, 31-44 (in Korean with English abstract).
- Oh, J.-W., 2009: Development of pollen concentration prediction models. *J. Korean Med. Assoc.*, **52**, 579-591.
- Park, K.-J., H.-A. Kim, K. R. Kim, J.-W. Oh, S.-Y. Lee, and Y.-J. Choi, 2008: Characteristics of regional distri-

- bution of pollen concentration in Korea peninsula. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, **10**, 167-176 (in Korean with English abstract).
- Pauling, A., M. W. Rotach, B. Clot, and Contributors to the European Aeroallergen Network (EAN), 2012: A method to derive vegetation distribution maps for pollen dispersion models using birch as an example. *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 949-958, doi:10.1007/s00484-011-0505-7.
- Schueler, S., and K. H. Schlunzen, 2006: Modeling of oak pollen dispersal on the landscape level with a meso-scale atmospheric model. *Environ. Model. Assess.*, **11**, 179-194.
- Siljamo, P., and Coauthors, 2013: A numerical model of birch pollen emission and dispersion in the atmosphere. Model evaluation and sensitivity analysis. *Int. J. Biometeorol.*, **57**, 125-136, doi:10.1007/s00484-012-0539-5.
- 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 emission module. *Int. J. Biometeorol.*, **57**, 45-58, doi:10.1007/s00484-012-0532-z.
- _____, and Coauthors, 2015: MACC regional multi-model ensemble simulations of birch pollen dispersion in Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 8115-8130, doi:10.5194/acp-15-8115-2015.
- Zhang, R., and Coauthors, 2013: Development of a regional-scale pollen emission and transport modeling framework for investigating the impact of climate change on allergic airway disease. *Biogeosciences*, **10**, 3977-4023, doi:10.5194/bgd-10-3977-2013.
- 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. *Geosci. Model Dev.*, **6**, 1961-1975, doi:10.5194/gmd-6-1961-2013.
- _____, P. Kaufmann, B. Petitpierre, O. Broennimann, A. Guisan, E. Gentilini, and M. W. Rotach, 2017: Numerical ragweed pollen forecasts using different source maps: a comparison for France. *Int. J. Biometeorol.*, **61**, 23-33, doi:10.1007/s00484-016-1188-x.