

도시지역 공중화분 농도와 기상조건과의 관계

Relationship between Pollen Concentration and Meteorological Condition in an Urban Area

오인보* · 김양호¹⁾ · 최기룡²⁾ · 이지호¹⁾

울산대학교 의과대학 환경보건센터,

¹⁾울산대학교 의과대학 직업환경의학교실, ²⁾울산대학교 생명과학부
(2013년 7월 30일 접수, 2013년 10월 13일 수정, 2013년 10월 14일 채택)

In-Bo Oh*, Yangho Kim¹⁾, Kee-Ryong Choi²⁾ and Ji Ho Lee¹⁾
Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine

¹⁾*Department of Occupational & Environmental Medicine,
University of Ulsan College of Medicine*

²⁾*Department of Biological Sciences, University of Ulsan*

(Received 30 July 2013, revised 13 October 2013, accepted 14 October 2013)

Abstract

This study attempted to determine important meteorological parameters related to airborne pollen concentrations in urban areas. Hourly pollen measurement data were prepared from a regular sampling with a volumetric Burkard spore trap at a site in the Ulsan city, during the spring season (March ~ May) of 2011. Results showed that the daily mean and maximum concentrations for total pollen counts during the spring season were statistically significantly correlated with both air temperature and wind speed; daily mean pollen concentration was the most highly related to daily maximum temperature ($r=0.567$, $p<0.001$). It was also identified that pollen concentration has a stronger relationship with wind speed at the rural site than at the urban one, which confirms that strong wind conditions over the pollen sources area can be favorable for pollen dispersal, resulting in increases in airborne pollen concentrations downwind. From the results of an oak-pollen episode analysis, it was found that there was a significant relationship between hourly variation of oak pollen concentrations and dynamic meteorological factors, such as wind and mixing height (representing the boundary layer depth); especially, a strong southwestern wind and elevated mixing height was associated with high nocturnal concentrations of oak pollen. This study suggests that temperature, wind, and mixing height can be important considerations in explaining the pollen concentration variations. Additional examination of complex interactions of multiple meteorological parameters affecting pollen behavior should be carried out in order to better understand and predict the temporal and spatial pollen distribution in urban areas.

Key words : Meteorological parameters, Ulsan, Pollen, Oak, Mixing height

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)52-250-8402, E-mail : oinbo@ulsan.ac.kr

1. 서 론

공중화분(airborne pollen)은 곰팡이(molds), 실내 단백질(indoor proteins) 등과 함께 알레르기 질환을 일으키는 중요한 공기중 항원(aeroallergens)으로 잘 알려져 있다. 최근 알레르기 질환의 증가(Asher *et al.*, 2006) 및 기후변화(특히 기온상승)와 관련하여 공중화분의 농도분포 특징과 알레르기유발성(allergenecity) 변화에 대한 관심이 커지고 있다(Beggs, 2004).

일반적으로 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수 등의 기상 조건은 공중화분의 시·공간적 농도 분포에 영향을 준다(Garcia-Mozo *et al.*, 2006; Jato *et al.*, 2000). 지역의 지리적 특성과 식생분포에 따라 그 영향 정도가 다르지만 대기 중에서의 꽃가루 거동(이류와 확산)을 이해하는데 있어 기상조건은 결정적이다. 특히 기후변화는 꽃가루가 비산하는 계절(pollen season)의 시기와 기간의 변화뿐만 아니라 양적인 증가 및 알레르기유발성의 상승과 관련됨으로, 공중화분 농도와 관여하는 중요한 기상인자를 파악하는 연구는 그 의미가 크다. 아울러 관련성 분석을 통해 도출된 유의한 기상인자들은 지역의 화분 비산량 추정에 활용될 수 있으며 이는 공중화분농도 예측의 정확도를 높일 수 있는 수치모델링 개발에 기여할 수 있고(Oh *et al.*, 2012) 궁극적으로 알레르기 환자들에게 1차적 예방(회피)에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

현재 국내에서는 공중화분과 기상인자들 간의 관련성 분석이 몇몇 연구에서 이루어졌고 기온, 강수량, 상대습도의 변화에 집중되어 포괄적으로 분석되었다(Oh *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2008; Chang and Kim, 1988). 이는 부족한 측정망과 지점분석의 한계로 설명된다. 그러나 보다 정확한 관련성 파악을 위해서는 대상지역 식생분포의 이해와 함께 기상모델링의 적용 등 연구방법의 개선이 필요하다.

본 연구에서는 울산 도심에서 2011년 봄철 모니터링된 공중화분 농도의 변화와 주변 기상조건과의 전반적인 관계를 산림분포를 고려하여 분석하였다. 특히 봄철 화분증(pollinosis) 유발에 깊이 관여하는 참나무(oak) 화분의 사례기간을 대상으로, 관측자료와 기상모델링 결과를 사용하여 단기간의 시간별 화분농도 변화와 관련하는 중요한 기상인자들을 파악하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상지역

울산광역시에는 우리나라 동남단 연안에 위치한 대도시로 약 백십만 명(2012년 기준)의 인구가 거주하고 있다. 울산만을 중심으로 복잡한 연안을 따라 국가산업단지(석유화학공단, 자동차 및 조선 산업시설 등)가 위치하고 있고 인근 내륙으로 도시역이 집중되어 형성되어 있다. 도심 주위로는 산지가 존재하며 비교적 높은 산들이(가지산: 1,240 m, 천황산: 1,189 m) 울산 서쪽경계에 위치하고 있다(그림 1a). 울산은 약 14°C의 연평균기온이 나타나며 비교적 온화한 기후를 가지고 있다. 바람조건은 경우, 연중 북서계열의 바람이 우세하나 늦봄부터 여름까지는 동풍계열 빈도가 높다(KMA, 2011).

그림 1b에는 산림청에서 운영하는 산림공간정보서비스(Foreast geographic information service, FGIS)의 수치입상도를 사용하여 추정된 울산지역과 주변의 소나무와 참나무를 합한 수종의 밀도 분포이다. 이들은 우리나라에 서식하는 대표적인 수종으로 잘 알려져 있고(산림면적 대비 44.6%)(Lee *et al.*, 2006) 참나무 화분의 경우 대표적인 알레르기 항원 중 하나이다(Oh, 2007). 그림 1b를 통해 울산 도심 주변의 수목류 꽃가루 배출원의 분포를 전반적으로 이해할 수 있고 기상조건(특히 바람)과의 관련성 해석에 참고할 수 있다.

2.2 공중화분 및 기상자료

본 연구에서 사용한 공중화분 자료는 2011년 봄철(3~5월)에 버커드 샘플러(Burkard 7-day recording volumetric spore sampler)(Burkard, 2013)로부터 측정된 시간별 총 화분농도(grains m⁻³)와 참나무 화분농도이다. 시간별 농도자료는 꽃가루의 채집과 검정 과정을 고려한다면 DB구축에 상당한 노력이 요구되는 자료이며 화분농도와 지상 기상조건과의 단기변화 관련성을 분석하는데 중요한 정보로 활용된다. 버커드 샘플러는 Hirst spore trap(Hirst, 1952)을 기반으로 개발된 것으로 대기 중 바이오에어로졸 성분 측정에 널리 사용되고 있다. 이 기기는 2010년 9월에 울산 대학교병원 환경보건센터가 도심지역 초등학교 옥상에(지상 약 20 m) 설치하여(주변의 건물로 인한 기류변화의 영향이 최소화된 곳) 현재 모니터링 시스템

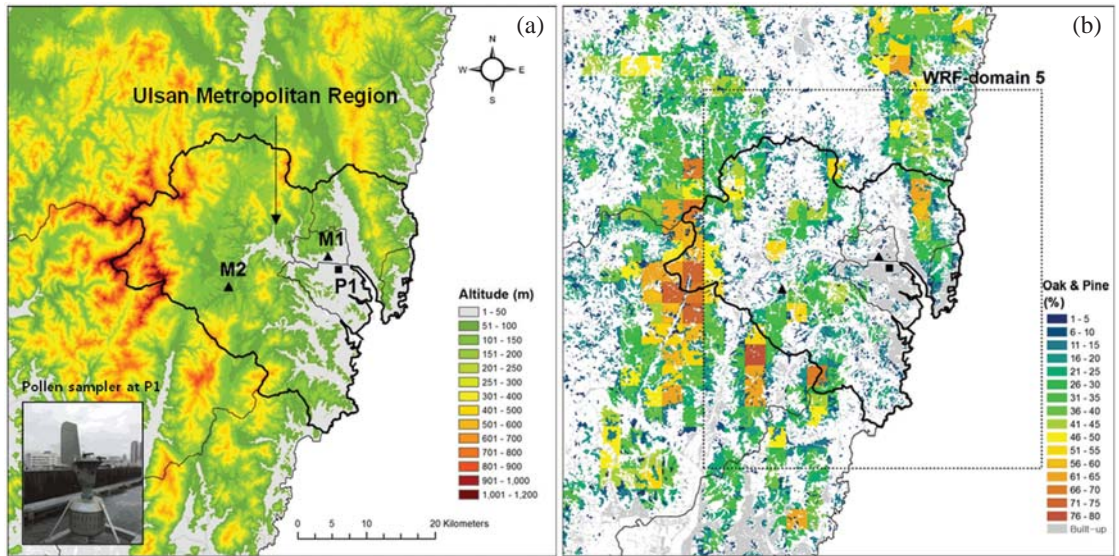


Fig. 1. (a) Pollen and meteorological monitoring sites in the Ulsan metropolitan region (UMR). P1 is the Ulsan pollen monitoring site operated by Environmental Health Center of Ulsan university; M1 (Ulsan ASOS station) and M2 (Samdong AWS site) indicate meteorological sites operated by Korea Meteorological Administration. The thick black line is the boundary of the UMR. (b) Density (%) of tree pollen (sum of Pinus and Oak) from FGIS digital forest type map. The inner dashed rectangle indicates the 1-km grid inner-most domain for WRF modeling.

을 운영하고 있다(P1, 그림 1a).

공중화분 채취방식은 강제흡입에 의한 채적법 방식으로 흡입구(Orifice)를 통하여 일정 유량(흡입유량 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$)의 외기를 강제적으로 흡인하여 회전 원통(drum) 위의 테이프에 화분을 채취한다. 채취 후 테이프를 24시간에 해당하는 48 mm씩 잘라서 slide glass 위에 붙이고 gentian violet glycerin jelly법으로 염색한 후 광학현미경을 이용하여 화분을 검경하게 된다. 공중화분 시료 계측은 미국공중생물학학회(Pan-American Aerobiology Association, PAAA) 산정법(Rogers and Mulilenberg, 2001)을 사용하였다(광학현미경 400 배로 테이프의 중앙부를 일렬만 카운트하고 공중화분을 분류하며 산정한 화분수를 1 m^3 당의 수로 변환함).

공중화분과 기상인자 간의 관계분석을 위해 본 연구에서는 화분모니터링 지점과 가장 인접한 울산광역시 지방기상대(M1)의 중관기상관측장비(Automatic synoptic observation system, ASOS)와 산림지역 주변에 위치한 삼동기상관측지점(M2)의 자동기상관측장비(Automatic weather system, AWS)(그림 1a)에서 각각 수집된 시간별 기온, 습도, 강수량, 풍향, 풍속 자료

를 사용하였다. M1지점의 경우 화분측정 지점인 P1과 같은 위치에 있지 않으나 두 지점 간의 거리(약 2 km), 평탄한 지형, 유사한 도시환경을 고려할 때 M1 지점의 관측정보가 P1 지점의 기상조건을 적절히 설명할 수 있다. 반면 M2 지점은 지리적 위치상 산림지역과 인접하여 화분배출원 지역의 기상조건을 전반적으로 반영한다고 볼 수 있다.

또한 본 연구에서는 지상 관측인자 외에 꽃가루의 공간적 거동과 관련할 수 있는 대기혼합고(mixing height) 정보를 고해상도 기상모델링을 통해 생성하여 참나무 화분 사례분석에 사용하였다. 모델링은 WRF(Weather Research & Forecasting model, v.3.4.1)(Skamarock *et al.*, 2008)를 사용하여 참나무 화분 사례기간(2011년 4월 24~5월 1일, 3.2절 참고)을 포함한 10일간(처음 2일은 spin-up 기간) 수행되었다. 동북아시아 영역부터 울산지역까지 총 5개의 영역을 설정하여(81, 27, 9, 3, 1 km 격자, 1 km 격자 모델영역은 그림 1b 참고) 경계조건의 불확실성을 줄이고 울산지역의 고해상도 기상정보를 계산하였다. 모델링 입력자료는 NCEP FNL자료와 고해상도 지형 및 토지피복

자료를 사용하였다(상세 내용은 Jeong *et al.* (2011) 논문 참고). 선택된 물리과정은 미세물리 모수화 방안은 WSM3(81, 27 km 영역)와 WSM6(9, 3, 1 km 영역), 장파 및 단파 복사모수화 방안은 RRTMG, 적운모수화 방법은 Kain-Fritsch scheme(81, 27 km 영역), 경계층모수화는 YSU scheme, 지표모수화는 Noah-LSM이 사용되었다(Wang *et al.*, 2010).

3. 연구 결과 및 토의

3.1 봄철 공중화분 농도와 기상조건과의 관계

울산지역은 봄에 화분농도가 가장 높고 화분농도의 뚜렷한 계절성이 나타난다(Choi *et al.*, 2011) (그림 2a). 이는 한 해 전체 기간을 대상으로 기상인자와의 관련성을 분석하는 방법이 적절치 않음을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 봄(3~5월) 기간으로 한정하여 매일의 화분농도와 주요 기상조건과의 전반적인 관련성을 분석하였다. 화분농도는 검경된 모든 화분에 대한 대기중 농도(pollen grains m⁻³) 값으로 일 평균과 일 최고값이며 기상인자는 M1과 M2 지점에서 관측된 기온, 풍속, 상대습도(M1 지점에서만 관측됨), 강수량 수치에 대해 적절한 통계지표를 생성하여 사용하였다.

표 1은 SPSS (version: 18.0) 통계프로그램을 사용하여 얻은 일 최고/평균 화분농도와 M1, M2 지점별 생성된 기상인자간의 피어슨(pearson) 상관계수(r)를 제시한 것이다. 기온인자는 선택된 기상인자들 중 가장 강한 상관을 보여 화분농도 변화를 설명하는데 가장 중요한 기상인자임을 확인할 수 있다. 일 최고농도 보다는 일 평균 농도가 기온과 다소 높은 상관도를 보였고 일 최고 기온이 평균 기온보다 화분 농

도변화와 관련이 높은 것으로 나타났다(일 평균 화분농도와 일 최고기온이 가장 관련성이 높음: r=0.567, p<0.001). 지역 간 비교에서는 M1과 M2 지역모두 기온 변화가 도심 화분농도 변화와 상관이 있었다. 본 연구에서 제시된 화분농도와 기온과의 양의 상관관계 정도의 차이가 있지만 다수의 선행연구에서도 확인된다(Park *et al.*, 2008; Altintas *et al.*, 2004; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2003; Jato *et al.*, 2000; Fernandez, *et al.*, 1998). 그림 2b는 분석기간 일 평균 화분농도와 기온의 변화를 시계열로 나타낸 것으로 기온변화에 따른 영향을 정량적으로 해석할 수 없지만 두 변수 간의 뚜렷한 양의 변화 경향이 잘 확인된다.

풍속의 경우, 기온과 비교해 상관의 정도는 약하지만 화분농도와 유의한 양의 관련성이 나타났다(M1 지점 풍속과 일평균 농도 관련성은 제외). 일반적으로 풍속의 증가는 화분의 비산(배출)을 강화시켜 대기 중 농도를 높이는데 기여하게 된다(Helbig *et al.*, 2004). M1 지점과 비교해 배출원 지역과 인근에 위치한 M2 지점의 풍속이 화분농도와 상관도가 높게 나타난 결과는 이러한 풍속정도와 배출량의 양의 관계를 잘 보여준다. 물론 단순히 풍속의 변화만으로 화분의 배출과 대기중의 농도를 설명할 수는 없다. 예로 매우 강한 풍속은 저기압의 영향과 관련하여 대기중 화분농도를 감소시킬 수 있는 조건이 될 수도 있다(Makra *et al.*, 2007).

상대 습도와 강수의 경우, 화분비산을 억제시키며 화분농도와 역 상관을 가지는 기상인자로 잘 알려져 있다(Rodríguez-Rajo *et al.*, 2003; Jato *et al.*, 2000). 이들 값이 높을수록 대기 중 화분농도가 낮을 가능성이 크지만 본 분석에서는 화분농도와 유의한 상관이 나타나지 않았다. 상대습도의 경우 시·공간적 차이가 크고 M2 지점의 자료가 없기 때문에 도시의 조

Table 1. Pearson correlation coefficient (r) between pollen concentration (grains m⁻³) and meteorological parameters (Spring in 2011, n=92).

Meteorological parameters	Daily max. pollen		Daily mean pollen	
	M1	M2	M1	M2
Air temperature (°C), daily mean	0.493**	0.483**	0.536**	0.509**
Air temperature (°C), daily max.	0.496**	0.498**	0.565**	0.567**
Wind speed (m/s), daily mean	0.215*	0.299**	0.197	0.315**
Relative humidity (%), daily mean	0.101	-	0.005	-
Precipitation (mm), daily total	-0.067	-0.060	-0.135	-0.129

*, **: Correlation is significant at the 0.05 level and 0.01 level (2-tailed).

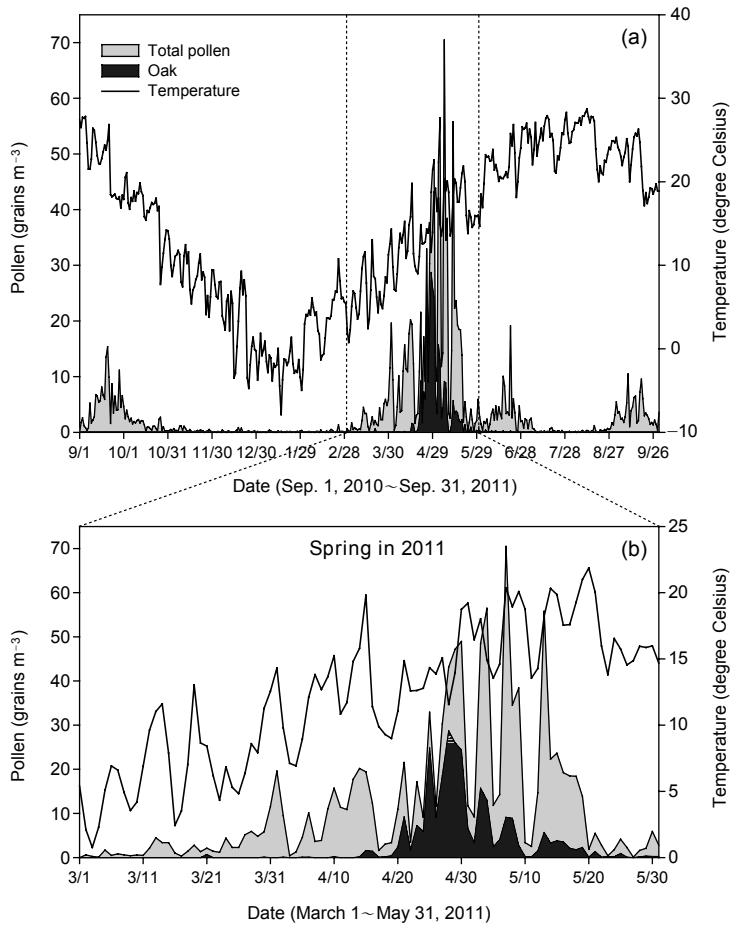


Fig. 2. Daily mean concentrations for total pollen and oak pollen counts and daily mean air temperature (a) for the period of September 2010 to September 2011 and (b) in spring of 2011.

건으로 배출과 연계된 화분의 대기농도를 이해하기에는 한계가 있다. 강수량의 경우는 음의 관련성이 나타나나 통계적으로 유의하지 않다. 하지만 분석기간 중 강수일수가 많지 않아(18일, M1 지점 1 mm 이상 강수 기준) 통계분석결과와 신뢰성은 높지 않다.

그림 3은 풍향과 화분농도와의 관련성을 분석한 것으로, M1 지점의 매일의 주풍(탁월풍)을 계산하여 구분된 풍향별 매일의 평균농도와 최고농도 분포를 보여준다. 풍향 범주는 전체 자료수와 해양의 위치를 고려하여 북동풍(NE), 남동풍(SE), 남서풍(SW), 북서풍(NW) 4개로 나누었다. 전반적으로 남서풍이 탁월할 때 농도가 가장 높게 나타나 울산지역 서쪽과 남서쪽

에 주로 위치한 배출원(산림)의 영향을 예상할 수 있다(그림 1b). 반면 남동풍이 탁월할 때는 남서풍조건과 비교해 화분농도가 뚜렷하게 낮다. 이는 해상 공기괴의 영향이 주된 원인으로 해석된다. 하지만 남서풍을 제외한 나머지 풍향에서는 농도차이가 뚜렷하지 않아 특정 지점에서 관측된 지상의 풍향으로 화분농도를 설명하기는 불충분함을 보여준다. 배출원 지역을 포함한 공간적인 기류 특성에 대한 정보가 필요할 것이다.

3.2 참나무 화분 사례분석

이 절에서는 봄철의 대표적인 공중화분이며(그림

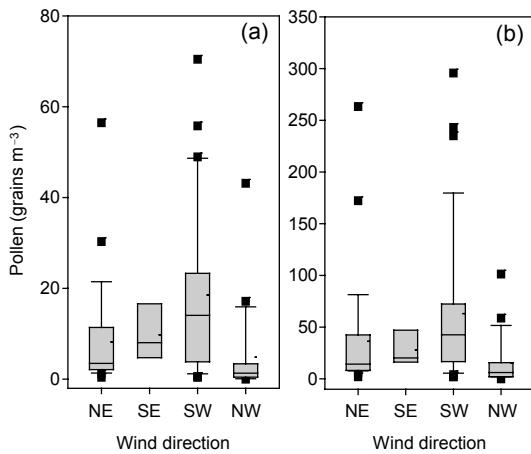


Fig. 3. Daily (a) mean and (b) maximum pollen concentrations by wind direction in spring of 2011.

2 참고) 알레르기 항원인 참나무 화분과 기상인자 간의 관계를 사례기간 측정된 시간별 자료를 사용하여 분석하였다. 사례기간은 연(2011년) 최고 1시간평균 참나무 화분농도(131 grains m⁻³)가 기록된 4월 27일을 포함한 총 8일간으로, 복잡한 화분농도 변화와 다양한 기상조건이 나타났다. 그림 4는 참나무 화분농도를 포함하여 M1 지점에서 관측된 기온, 상대습도, 강수량, 바람(바람벡터)과 WRF 기상모델링을 통해 계산된 대기혼합고(화분 측정지점을 중심으로 9개 격자 평균값)의 시간별 변화를 보여준다.

우선 참나무 화분농도는(그림 3a의 실선) 일반적으로 오전에 상승하여 오후에 정점에 이르지만(Corden and Millington, 1999) 본 사례기간에서는 시간에 따른 농도변화가 크며 야간에 고농도가 나타나는 등 정형화된 일변화 패턴이 나타나지 않았다. 이는 측정지점

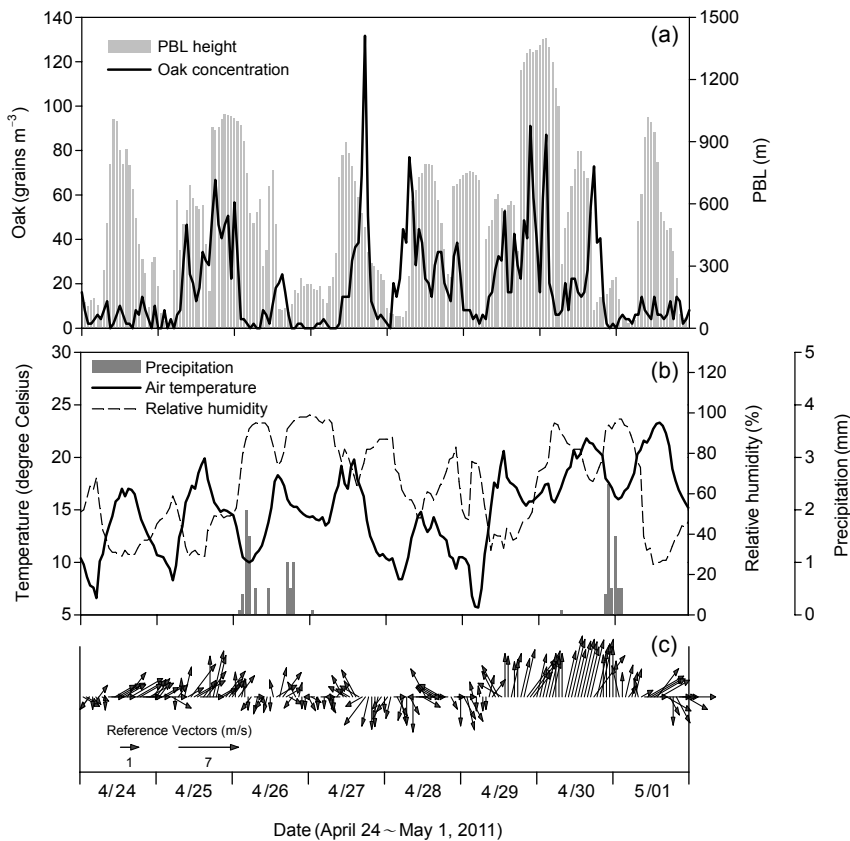


Fig. 4. Hourly variation of airborne oak pollen concentrations, mixing height, precipitation amount, temperature, relative humidity, and wind vectors during oak pollen episode (April 24 ~ May 1, 2011).

이 화분 배출원인 산림지역이 아니라는 점과 함께 바람 및 대기혼합고와 같은 역학적 기상인자에 크게 영향 받기 때문에 해석된다. 사례기간 시간자료 분석에서 물리적 기상요소인 기온과 상대습도($r=0.186, 0.188, p<0.01$)에 비해 대기혼합고와 풍속이 화분농도와 높은 상관($r=0.361, 0.357, p<0.01$)이 나타나는 것은 이를 설명한다.

사례기간 중 강수현상(그림 3b의 bar)의 영향을 받은 4월 26일과 5월 1일은 낮은 참나무 화분농도가 나타나 강수에 의한 직접적인 화분 제거효과(wash-out effect)를 보여준다. 상대적으로 강수의 영향이 없고 기온이 높았던 25일, 27일, 29일, 30일의 경우 전반적으로 낮 동인의 화분농도 상승을 볼 수 있다. 특히 27일 18시의 단기적 고농도($131 \text{ grains m}^{-3}$) 현상은 풍향의 전환과(남동풍(110도, 1600 LST)에서 북동풍(50도, 1800 LST)) 비교적 강한 풍속(4.7 m s^{-1} , 1800 LST)이 존재한 지점에서(그림 3c) 나타난 것으로 북동쪽에 위치한 산림지역으로부터(그림 1 참고) 참나무 화분이 수송되어 측정지점에 영향을 미친 것으로 예상된다.

사례기간 중 나타난 특징적인 참나무 화분농도의 변화는 야간 고농도 현상이다. 4월 25~26일 야간(51 grains m^{-3} (25일 2300 LST), 57 grains m^{-3} (26일 0100 LST))과 4월 29~30일 야간(91 grains m^{-3} (29일 2200 LST), 87 grains m^{-3} (30일 0300 LST))에 농도의 상승을 뚜렷하게 볼 수 있는데 이러한 현상은 대기혼합고의 상승 및 강한 남서풍조건이 중요한 원인이 될 수 있다. 일반적으로 야간의 대기혼합고 상승은 강한 풍속조건과 관련한 대기하층의 안정층 파괴로 설명되며 이는 연직적 대기혼합과정을 통해 대기상층 고농도의 오염물질 등이 지상부근 농도 상승에 기여할 수 있는 조건을 형성시키게 된다(Reitebuch *et al.*, 2000; Corsmeier *et al.*, 1997).

사례기간 분석을 통해 참나무 화분농도의 시간적 변화와 고농도 현상은 대기혼합고 및 바람의 변화와 관련성이 높게 나타났고 몇몇의 물리적 기상인자로 화분농도의 변화를 충분히 설명할 수 없음을 보여주었다. 물론 이러한 결과의 신뢰성은 화분측정지점의 위치와 주변 환경, 분석기간의 선택 등의 문제로 영향을 받을 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구를 통해 공중화분 농도변화와 관련하는 주요 기상인자들이 파악되었다. 봄철 도심에서 모니터링된 총 화분의 농도변화와 인근 기상관측소에서 관측된 기온(특히 일 최고기온)이 가장 높은 상관성(최고 $r=0.567$)을 보였다. 이는 산림지역과 인접한 지점에서 관측된 기온과 도시의 화분농도와의 상관성과 유사하여, 지역의 화분농도 변화를 설명할 수 있는 주변 기온정보의 국지적 한계는 크지 않음을 예측할 수 있다. 화분의 배출과 수송을 설명하는 중요한 기상인자인 풍속의 경우, 도심보다는 꽃가루 배출원인 산림 인근 지역의 풍속조건이 도시의 화분농도를 상대적으로 잘 설명함을 보여주었다. 풍향의 경우는 풍향조건에 따른 화분농도 차이가 유의하게 나타났고 화분 배출원이 풍하측에 위치하게 되는 남서풍조건에서 상대적으로 농도가 높았다. 이러한 결과는 화분농도 변화의 이해를 위해서는 배출원과 측정지점을 포함한 도시/지역규모 3차원 바람정보가 필요함을 의미한다.

참나무 화분 사례일 분석을 통해서 참나무 화분농도의 복잡한 시간변화와 기상인자, 특히 바람과 대기혼합고 조건이 크게 관여함을 알 수 있었다. 이는 단순히 지점의 기온, 상대습도 등의 물리적 인자로 단기간의 화분농도를 설명할 수 없음을 의미한다. 특히 야간의 고농도 현상은 야간의 대기혼합고의 상승 및 강한 남서풍조건과 관련하며, 특정 기상조건이 일 중 시기와 관계없이 공중화분 농도 상승과 관련될 수 있음을 잘 보여준다.

본 연구는 다양한 기상인자가 공중화분의 거동과 관련함을 제시하고 있다. 하지만 한 지점 화분자료의 사용, 단기간의 분석 등에서 올 수 있는 해석의 한계는 분명 존재한다. 궁극적으로 알레르기 화분의 인체 노출을 회피하고 예방하기 위해서는 화분농도의 시·공간적 분포특성을 정확히 이해하고 장·단기 예측기술의 확보가 필요할 것이다. 이를 위해서는 공중화분 측정망의 확대, 지속적인 모니터링과 함께 화분의 생성, 수송, 침적 및 재비산 과정을 과학적으로 고려할 수 있는 수치모델의 개발과 활용이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경보건센터 재원에 의해 이루어졌습니다.

References

- Altintas, D.U., G.B. Karakoç, M. Yilmaz, M. Pinar, S.G. Kendirli, and H. Cakan (2004) Relationship between Pollen Counts and Weather Variables in East-Mediterranean Coast of Turkey - Does it Affect Allergic Symptoms in Pollen Allergic Children?, *Clinical & Developmental Immunology*, 11(1), 87-96.
- Asher, M.I., S. Montefort, B. Bjorksten, 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 multicountry cross-sectional surveys, *Lancet*, 368, 733-743.
- Beggs, P.J. (2004) Impacts of climate change on aeroallergens: past and future, *Clin Exp Allergy*, 34, 1507-1513.
- Burkard (2001) 7-day recording volumetric spore trap. [Available online at <http://www.burkard.co.uk/7dayst.htm>]
- Chang, N.-K. and J.-G. Kim (1988) A study on the diurnal change of pinus rigida pollen deposition in mt. Kwan-ak, *Korean J. Ecol.*, 11(4), 193-200.
- Choi, S.-H., I.-Y. Jung, D.-Y. Kim, Y.-H. Kim, J.-H. Lee, I.-B. Oh, and K.-R. Choi (2011) Seasonal distribution of airborne pollen in Ulsan, Korea in 2009-2010, *J. Ecol. Field Biol.*, 34(4), 371-379, 2011.
- Corden, J. and W. Millington (1999) A study of Quercus pollen in the Derby area, UK, *Aerobiologia*, 15, 29-37.
- Corsmeier, U., N. Kalthoff, O. Kolle, M. Kotzian, and F. Fiedler (1997) Ozone concentration jump in the stable nocturnal boundary layer during a LLJevent, *Atmos. Environ.*, 31(13), 1977-1989.
- Fernandez, I.I., M.J. Aira, and V. Jato (1998) Poaceae pollen in the atmosphere of Santiago de Compostela: its relationship with meteorology, *Aerobiologia*, 14, 141-145.
- Garcia-Mozo, H., C. Galan, V. Jato, J. Belmonte, C. de la Guardia, D. Fernandez, M. Gutierrez, M. Aira, J. Roure, L. Ruiz, M. Trigo, and E. Dominguez-Vilches (2006) Quercus pollen season dynamics in the iberian peninsula: response to meteorological parameters and possible consequences of climate change, *Ann. Agric. Environ. Med.*, 13, 209-224.
- Helbig, N., B. Vogel, H. Vogel, and F. Fiedler (2004) Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale, *Aerobiologia*, 20, 3-19.
- Hirst, J.M. (1952). An automatic volumetric spore trap, *Ann. Appl. Biol.*, 39, 257-265.
- Jato, M.V., F.J. Rodríguez, and M.C. Seijo (2000) Pinus pollen in the atmosphere of Vigo and its relationship to meteorological factors, *Int. J. Biometeorol.*, 43, 147-153.
- Jeong, J.-H., I.-B. Oh, D. Ko, and Y.-K. Kim (2011) The characteristics of seasonal wind fields around the Pohang using cluster analysis and detailed meteorological model, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(6), 737-753.
- Korea Meteorological Administration (2011) Climatological normals of Korea (1981~2010), Publication No.: 11-1360000-000077-14, 678 pp.
- 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, *Jour. Korean For. Soc.*, 95(6), 663-671. (in Korean with English abstract)
- Makra, L., M. Juhász, J. Mika, A. Bartzokas, R. Béczi, and Z. Süsmeghy (2011) Relationship between the Péczeley's large-scale weather types and airborne pollen grain concentrations for Szeged, Hungary, *Grana*, 46(1), 43-56.
- Oh, I.-B., 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. (2007) Characteristics of allergic pollen and the pollen amount was recently changed in Korea, *Korean J. Asthma Allergy Clin. Immunol.*, 27(1), 1-7. (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 (2009) The association between the concentration of pollen and outbreak of pollinosis in childhood, *Pediatr. Allergy Respir. Dis. (Korea)*, 19(1), 4-11. (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)
- Reitebuch, O., A. Strassburger, S. Emeis, and W. Kuttler (2000) Nocturnal secondary ozone concentration maxima analysed by sodar observations and surface measurements, *Atmos. Environ.*, 34(2000), 4315-4329.
- Rodríguez-Rajo, F.J., V. Jato, and M.J. Aira (2003) Pollen content in the atmosphere of Lugo (NW Spain) with reference to meteorological factors (1999~2001), *Aerobiologia*, 19, 213-225.
- Rogers, C.A. and M. Muilenberg (2001) Pan-American Aerobiology Association Standardized Protocols Comprehensive guidelines for the operation of Hirst-type suction bioaerosol samplers, The Pan American Aerobiology Association. [Available online at <http://www.paaa.org/StandardizedProtocols.pdf>]
- Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J.G. Powers (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR TECHNICAL NOTE, NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA, 113 pp.
- Wang, W., C. Bruyère, M. Duda, J. Dudhia, D. Gill, H.-C. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, and X. Zhang (2010) Weather Research & Forecasting, ARW Version 3 Modeling System User's Guide, Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research.