

생물성 연소 지표물질을 이용한 서울시 초미세먼지 평가

대기환경연구부 기후대기팀

심미희 · 이원영 · 신윤미 · 박세영 · 엄정훈 · 양혜란 · 오석률 · 이만호 · 어수미

Evaluation of PM 2.5 Using Biomass Burning Materials in Seoul

Climate and Air Quality Research Team

**Mi-hee Shim, Won-young Lee, Yoon-mi Shin,
Se-young Park, Jung-hoon Uhm, Hye-ran Yang,
Suk-ryul Oh, Man-ho Lee and Soo-mi Eo**

Abstract

Biomass burning, such as forest fires, domestic heating, and combustion of agricultural residues, can have a significant impact on air quality. Representative biomass burning tracers include levoglucosan, mannosan, and galactosan.

In this study, the concentrations of these tracers were measured at two air monitoring stations in Seoul.

In 2018, the concentration of levoglucosan ranged from 18.6 to 211.5 ng/m³ at Jong-ro and 17.7 to 216.4 ng/m³ at Gwang-jin, showing a pattern typically high in winter and low in summer. The correlations of levoglucosan with PM2.5, OC, EC were high in winter and fall, while low correlations were found in spring and summer. The effect of biomass burning on PM2.5 concentration changes in winter was large.

The concentration of levoglucosan showed different trends, relative to PM2.5 high concentration, in March and November. In March, the concentration of levoglucosan increased the day before the PM2.5 concentration increased rapidly. In November, the concentration of levoglucosan remained high during the period of PM2.5 increase.

Key words : PM2.5, biomass burning, levoglucosan, correlation analysis

서론

미세먼지에 대한 관심이 나날이 높아지고 있다. 정보의 발달로 미세먼지 수치를 실시간으로 알 수 있고 미세먼지에 대한 위해성을 하루에도 수십 번씩 접하는 상황에서 사람들의 불안감은 더욱 커져가고 있다. 실제로 이전보다 미세먼지의 농도가 수치적으로 급격히 높아지지 않았음에도 불구하고 사람들이 체감하고, 인식하는 미세먼지의 강도는 더욱 높아졌다고 할 수 있다. 특히 겨울에서 봄까지 미세먼지의 농도가 높아지는 시기에는 일반시민들이 미세먼지 저감 대책을 강력히 요구하고 있는 실정이다.

이에 미세먼지 저감을 위한 다양한 정책들이 쏟아져 나오고 있고, 이와 관련된 수많은 연구들이 진행 중이다. 환경부에서는 선진국 수준으로의 미세먼지 환경기준 강화, 관련 법 제정 등 적극적인 노력을 기울이고 있으며, 서울시 역시 서울형 비상저감대책 정책 아래 초기 대중교통 무료라는 정책을 강행하면서까지 시민들이 체감할 수 있는 미세먼지 저감 대책마련에 고심하고 있다.

이러한 미세먼지 저감을 위해서는 미세먼지 발생원을 정확히 파악하여 그에 알맞는 대책을 마련하는 것이 적절하며, 이에 초미세먼지의 성분 분석 등을 통한 발생원 기여도 평가로 대기질을 개선하는 방안이 지속적으로 연구 중이다(1).

미세먼지 발생원에는 여러 요인이 있지만 본 연구에서는 주요배출원인 생물성 연소로 인한 미세먼지 발생에 관심을 두고자하였다. 생물성 연소는 산불, 농업잔재물 소각, 난방이나 취사를 위한 나무소각으로, 대표적인 생물성 연소물질로는 세포벽 성분인 셀룰로오스가 열분해됨으로써 생성되는 레보글루코산(Levogluconan)이 있다. 레보글루코산은 수용성 단당류로 대기에서 매우 안정한 물질이며, 미세먼지의 생물성 연소 발생원 추적연구에서 지표물질로 알려져 있다(2).

Jung, J.S et al.(2016)은 러시아 시베리아 산불과 한반도 초미세먼지와와의 상관성을 입증하는 연구발표로 화제가 된 바 있는데, 러시아 시베리아 산불에서 생성된 생물성 연소 지표물질, 레보글루코산을 분석함으로써 그 관계를 입증했다. 러

시아 시베리아에서 발생한 산불이 한반도 미세먼지 농도에 영향을 미친다는 것이 주된 내용이다(3). 이 후 2018년에도 중국 춘절폭죽축제와 우리나라 초미세먼지와의 관계를 입증하는 내용으로 레보글루코산 관련 논문이 발표되었고(4), 생물성 연소로 인한 대기 중 미세먼지 성분 분석 연구가 지속적으로 수행되고 있다(2~9).

본 연구에서는 서울 종로, 광진 두 지역을 대상으로 초미세먼지의 발생원의 일부인 생물성 연소에 관해 특정 지표물질(Levogluconan, Mannosan, Galactosan)을 이용, 농도분포 모니터링 및 특성을 파악하고자 하였다. 이를 통해 서울시 초미세먼지 내 생물성 연소로 인한 대기오염 기여도 분석 및 지속적 모니터링을 통한 초미세먼지 저감정책 수립, 대기환경 개선의 기초자료 제공에 기여하고자 한다. 또한 초미세먼지 고농도 발생시 레보글루코산의 농도경향을 파악하여 고농도 발생시 그에 적절한 제어방안을 마련할 수 있도록 하고자 한다.

시료채취 및 분석방법

1. 시료채취

시료채취 지점은 서울지역의 2지점, 종로 측정소(이하 종로)와 광진 측정소(이하 광진)으로, 종로는 종로5, 6가 주민센터 옥상, 광진은 구의역아리수 정수센터 내 측정소에 각각 설치되었다(그림 1). 종로는 서울 도심의 일반상업지역으로 상가, 주택이 혼재되어 있고, 광진은 서울의 남동쪽 외곽으로 경기도 경계와 비교적 가까운 지역이라 할 수 있다.

샘플러는 low volume air sampler(KN-L25P1, KNJ, Korea)를 이용, 유량 16.7 L/min 으로 24 시간동안 포집하였으며, 시료채취여지는 석영여지(Quartz filter, Whatman)를 사용, 여지는 시료채취 전 800℃에서 2시간 강열처리하였다. 채취기간은 2018년 1~12월로 매주 5일, 2주 이상을 채취하였으나, 1월은 시료채취일정관계로 3일 측정하였다.



Fig. 1. Sampling site at Jong-ro and Gwang-jin.



2. 실험방법

1) 시료의 전처리

레보글루코산(Levogluconan), 마노산(Mannosan), 갈락토산(Galactosan)의 전처리는 일본 환경성 레보글루코산 측정방법(유도체화/GC-MS법)을 참고하였다. 전처리는 크게 용매추출, 필터여과, 질소가스 건조, 유도체화 과정으로 진행되며, 그림 2의 과정과 같다.

먼지를 채취한 필터를 40 mL 시험관에 넣고 내부표준물질(d7-levogluconan) 10 μ L를 첨가, 2:1 (v/v) dichloromethane : methanol 7 mL을 넣고 30분동안 초음파로 추출과정을 거쳤다. 1차 초음파 추출액을 PTFE 필터(0.20 μ m, 25 mm)를 장착한 주사기로 여과한 후 다시 시험관에 2:1 (v/v) dichloromethane : methanol 5 mL을 넣고 2차 초음파 추출을 하였다. 역시 추출 후 필터 여과과정을 거쳤다. 두 차례에 걸친 추출과정의 용매는 질소가스로 완전히 용매가 휘발될 때까지 건조하였으며, 건조한 관에 20 μ L anhydrous pyridine, BSTFA+1%-TMCS 100 μ L, 1:1

(v/v) dichloromethane : hexane 280 μ L 넣어 전량 400 μ L으로 한 후 vortexing 한 다음 80°C 2시간 유도체화 과정을 거쳤다. 그 후 1:1(v/v) dichloromethane : hexane 200 μ L를 첨가, vials

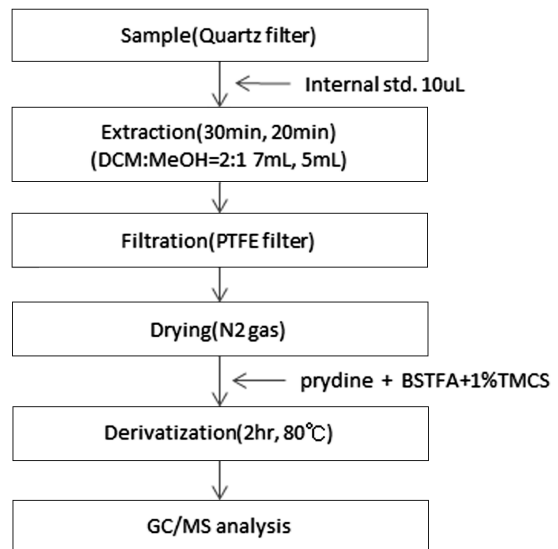


Fig. 2. Pretreatment and analytical procedure.

에 옮겨 담아 분석을 준비하였다. 검량선은 표준액을 시료와 동일하게 유도체화 전처리 과정을 거친 후 작성하였다(5).

유도체화 시약은 BSTFA(N,O-bis(trimethylsilyl)trifluoroacetamide)+1%-TMCS(Trimethylchlorosilane) sigma 제품을 사용하였으나 연구기간 중 단종되어 Thermo 제품으로 바꾸었다. 시약변경으로 인한 비교분석을 실시해 실험결과 값에 차이가 없음을 확인하였다.

2) 시료의 분석

분석기기는 가스크로마토그래프 질량분석기로(GC/MS)로, 가스크로마토그래프는 Agilent technologies 7890N, 질량분석기는 5975C inert XL MSD를 사용하였다. 자세한 분석 조건은 표 1과 같다.

결과 및 고찰

1. 내부정도관리

분석방법의 신뢰도 검증을 위해 내부정도관리를

수행하였으며, 검출한계(LOD, Limit of detection), 정량한계(LOQ, Limit of quantitation), 직선성(linearity), 회수율(recovery), 정밀도(precision)을 평가하였다. 직선성은 0.9967~0.9989로 양호한 결과를 나타내었다. 회수율과 정밀도는 NIST SRM(2786, fine Atmospheric Particulate Matter, particles <4 um)을 사용하여 결과값을 산출하였다.

검량선 직선성 0.99 이상, 정밀도 10% 이내, 정확도 20% 이내 기준 만족하여 분석결과와 신뢰도를 확보하였다. Low volume air sampler로 24시간 포집한다고 가정하였을 때, 레보글루코산의 대기 중 검출한계농도는 0.1 ng/m³, 대기 중 정량한계는 0.3 ng/m³이다. 마노산은 검출한계 0.3 ng/m³, 정량한계 0.9 ng/m³, 갈락토산은 각각 0.1 ng/m³, 0.4 ng/m³이다(6).

2. 지점별, 월별, 계절별 농도변화

많은 연구에서 레보글루코산의 농도는 계절적으로 뚜렷한 추세를 나타내고 있다(7). 겨울은 농업 잔재물 소각, 산불, 난방 등 생물성 연소 요인이 많은 관계로 농도가 높고, 반면 생물성 연소 요인

Table 1. The operation parameters of GC/MS for analysis

Parameter	Operating conditions
Column	DB5(30 m × 0.25 mm ID 0.25 μm film thickness)
Flow Rate	1.5 mL/min
Injection volume	10 μL
Oven temp.	80°C (5min) → 3°C/min → 200°C (2min) → 15°C/min → 300°C (5min)
Inlet mode/temp.	split mode/270°C

Table 2. Results of the validation test

Chemicals	Levoglucozan	Mannosan	Galactosan
LOD(ng/m ³)	0.1	0.3	0.1
LOQ(ng/m ³)	0.3	0.9	0.4
Linearity(R ²)	0.9967	0.9989	0.9989
Recovery(%)	90.9	86.8	109.5
Precision(%)	0.3	5.4	4.0

이 적은 여름에는 낮은 농도분포를 따르고 있으며, 본 연구에서 역시 같은 경향을 나타내었다.

2018년 서울 종로, 광진지역의 레보글루코산, 마노산, 갈락토산의 월별 농도는 그림 3~4와 같다. 2018년 평균 레보글루코산의 월평균 농도범위는 종로 18.6~211.5 ng/m³, 광진 17.7~216.4 ng/m³, 마노산은 종로 1.4~26.6 ng/m³, 광진 1.4~31.2 ng/m³, 갈락토산은 종로 0.7~26.8 ng/m³, 광진 0.6~26.8 ng/m³이다.

PM2.5의 연간 농도변화에서는 PM2.5 고농도

사례가 온 3월, 5월, 11월에 높은 평균 농도값을 가졌으나 레보글루코산 등 생물성 지표물질은 고농도로 인한 평균농도 증가는 없는 것으로 나타났다. 즉, PM2.5의 단기 고농도 사례시, 즉 주의보 또는 비상저감조치가 발령되는 일시적 고농도 경우에는 PM2.5에 대한 생물성 연소 농도 증가는 크지 않았다.

그림 5은 문헌에서 보고된 다른 지역에서의 레보글루코산의 농도를 나타내었다. 2018년 서울 종로, 광진의 레보글루코산의 전체 평균농도는 75.2

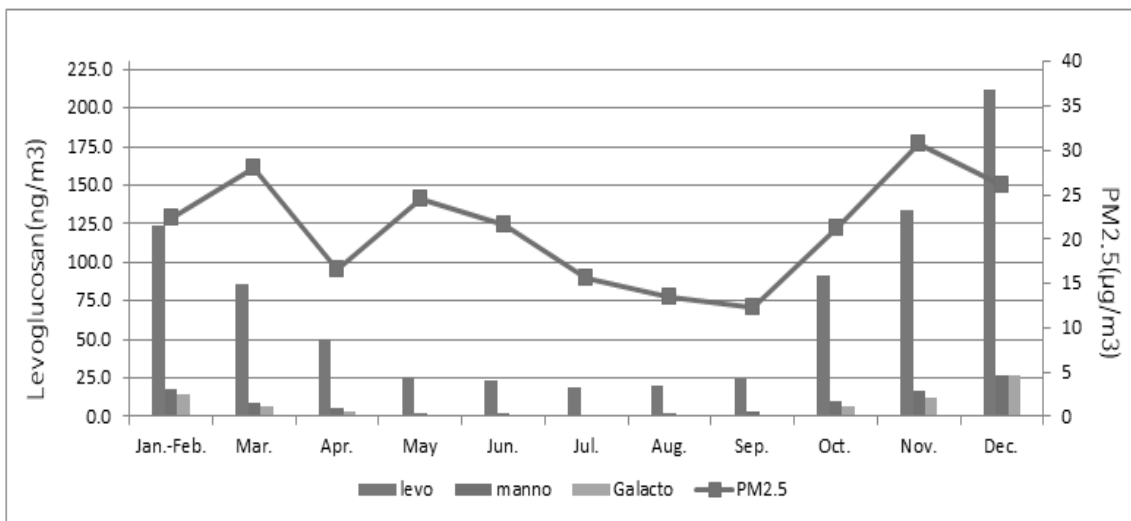


Fig. 3. Monthly concentration of levoglucosan, Mannosan, Galactosan at Jong-ro.

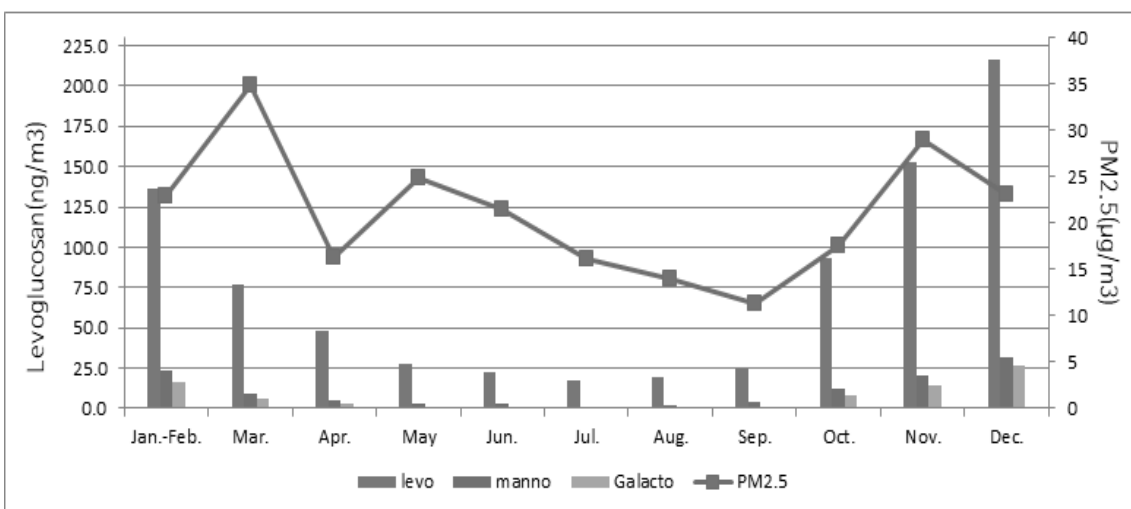


Fig. 4. Monthly concentration of levoglucosan, Mannosan, Galactosan at Gwang-jin.

$\pm 65.9 \text{ ng/m}^3$, 겨울평균농도는 $153.5 \pm 73.1 \text{ ng/m}^3$ 로, Ting Zhang 등에서는 중국 시안 $428 \pm 399 \text{ ng/m}^3$, 베이징 $307 \pm 345 \text{ ng/m}^3$, 이탈리아 투스카니 41.4 ng/m^3 으로, 서울은 이탈리아보다는 높은 농도를 보이지만 중국 베이징, 시안, 체코와 비교해보면 약 17~24%의 농도를 나타내고 있는 것으로 나타났다(8).

본 연구의 측정지점인 두 지점에서 레보글루코산의 월별 농도변화를 비교해보면 그림 6과 같다. 레보글루코산의 농도가 높아지는 겨울철 11~2월의 경우 광진지역이 종로지역보다 1.02~1.14 배 농도가 높은 것으로 분석되었다. 종로는 도심지역

의 특성을 고려할 때 생물성 연소에 기인할 만한 원인이 크게 존재하지 않는 것으로 파악되며, 광진은 생물성 연소 요인이 많은 외곽지역 경기도의 영향을 받는다고 고려할 때 농도가 다소 높아진 것으로 판단된다. 그러나 두 지점간의 차이가 크지 않아 보다 장기적인 데이터의 수집으로 두 지점의 경향을 보는 것이 필요하다고 생각된다.

3. 계절별 레보글루코산 농도 특성

대표적인 생물성 연소지표물질인 레보글루코산의 계절적 특성을 파악하기 위해 PM2.5, OC (Organic carbon), EC(Element carbon) 과의

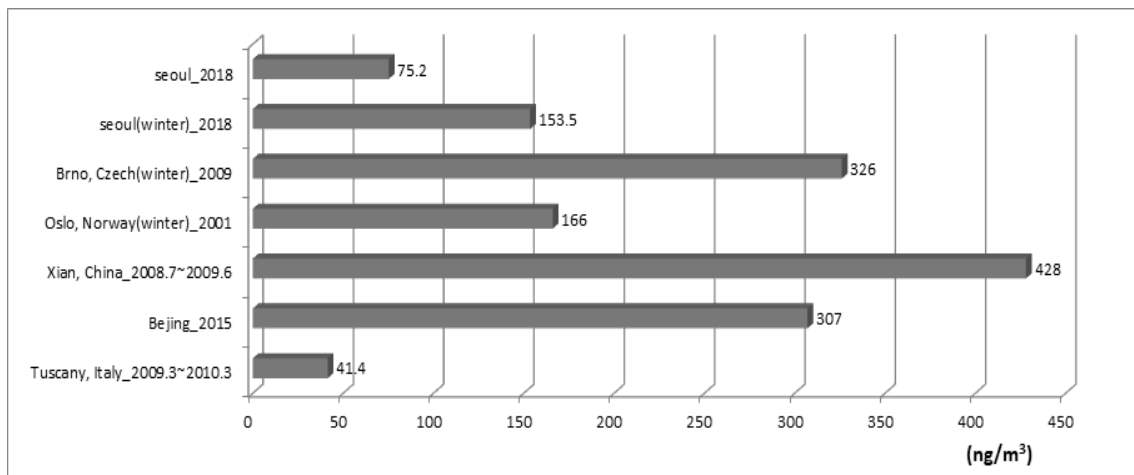


Fig. 5. Comparison of average levoglucosan concentration in other cities.

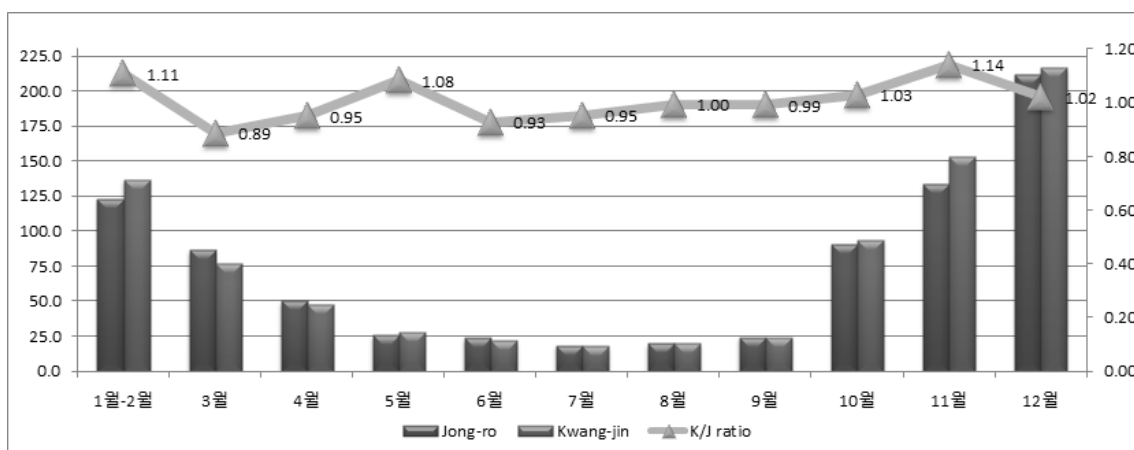


Fig. 6. Monthly concentrations of levoglucosan at Jong-ro and Kwang-jin and ratio between the sites.

상관성을 살펴보았다. 보다 장기적인 계절적 경향을 살펴보기 위해 2017~2018년 2년간의 분석자료를 이용하였다. 2017~2018년의 레보글루코산, PM2.5, OC, EC의 계절별 농도는 표 3과 같다. PM2.5의 계절별 평균농도 편차는 크지 않은 반면 레보글루코산과 OC, EC는 계절별로 뚜렷한 특성을 나타내었다.

통계프로그램 IBM SPSS Statistics 24 프로그램을 이용하여 피어슨상관계수를 이용한 상관분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

분석결과, 겨울의 경우, 레보글루코산은 PM2.5, EC, OC와의 상관계수가 0.653~0.823로 99% 신뢰수준에서 높은 상관성을 가지고 있었으며, 전체적인 일별 그래프에서도 PM2.5와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 가을 역시 상관계수가 0.609~0.770로 나타나, 겨울과 가을의 PM2.5, EC, OC의 생성에 생물성 연소가 유의미한 관계

가 있다고 판단된다. 반면 봄과 여름의 경우 레보글루코산과 PM2.5, OC, EC의 상관계수는 0.327~0.521로, 생물성 연소와의 상관성은 낮은 것을 알 수 있었다(9).

계절별로 PM 2.5에 미치는 생물성 연소의 상관성 및 기여도는 차이를 나타냈으며, 특히 겨울철에는 생물성 연소에 의한 농도가 높으며 초미세먼지 농도의 경향을 따르고 있어 초미세먼지의 관리를 위해서는 생물성 연소의 제어가 초미세먼지 농도저감에 효과가 있을 것으로 판단되었다.

4. 고농도 초미세먼지 발생시 농도특성

2018년 초미세먼지 주의보는 총 7차례 발령되었으며, 1, 2, 3월에 각각 2회, 11월에 1회로 주로 겨울에 집중되어 있다. 본 연구에서의 고농도 초미세먼지 발생시 농도특성을 알아보기 위해 샘플링 기간과 겹치는 3월과 11월 초미세먼지 주의보

Table 3. Seasonal and annual mean concentration of PM2.5, OC, EC and biomass burning tracer levoglucosan at Jong-ro and Gwang-jin

	Levoglucosan (ng/m ³)	PM2.5 (ug/m ³)	OC (ug/m ³)	EC (ug/m ³)
Winter	158.9	22.7	4.2	1.6
Spring	61.7	22.2	3.0	1.0
Summer	19.7	19.6	2.9	0.9
Fall	90.0	20.2	3.7	1.2
Mean	83.4	21.1	3.5	1.2
SD	73.7	13.1	1.7	0.8
Min.	7.3	3.8	0.8	0.2
Max.	452.5	80.8	11.4	7.5

Table 4. Correlation coefficients between levoglucosan & PM2.5, OC, EC

Season	Levoglucosan & PM2.5	Levoglucosan & OC	Levoglucosan & EC
Winter	0.823**	0.860**	0.653**
Spring	0.327**	0.521**	0.391**
Summer	0.354**	0.658*	0.502**
Fall	0.746**	0.770**	0.609**

* Correlation is significant at the 0.05 level

** Correlation is significant at the 0.01 level

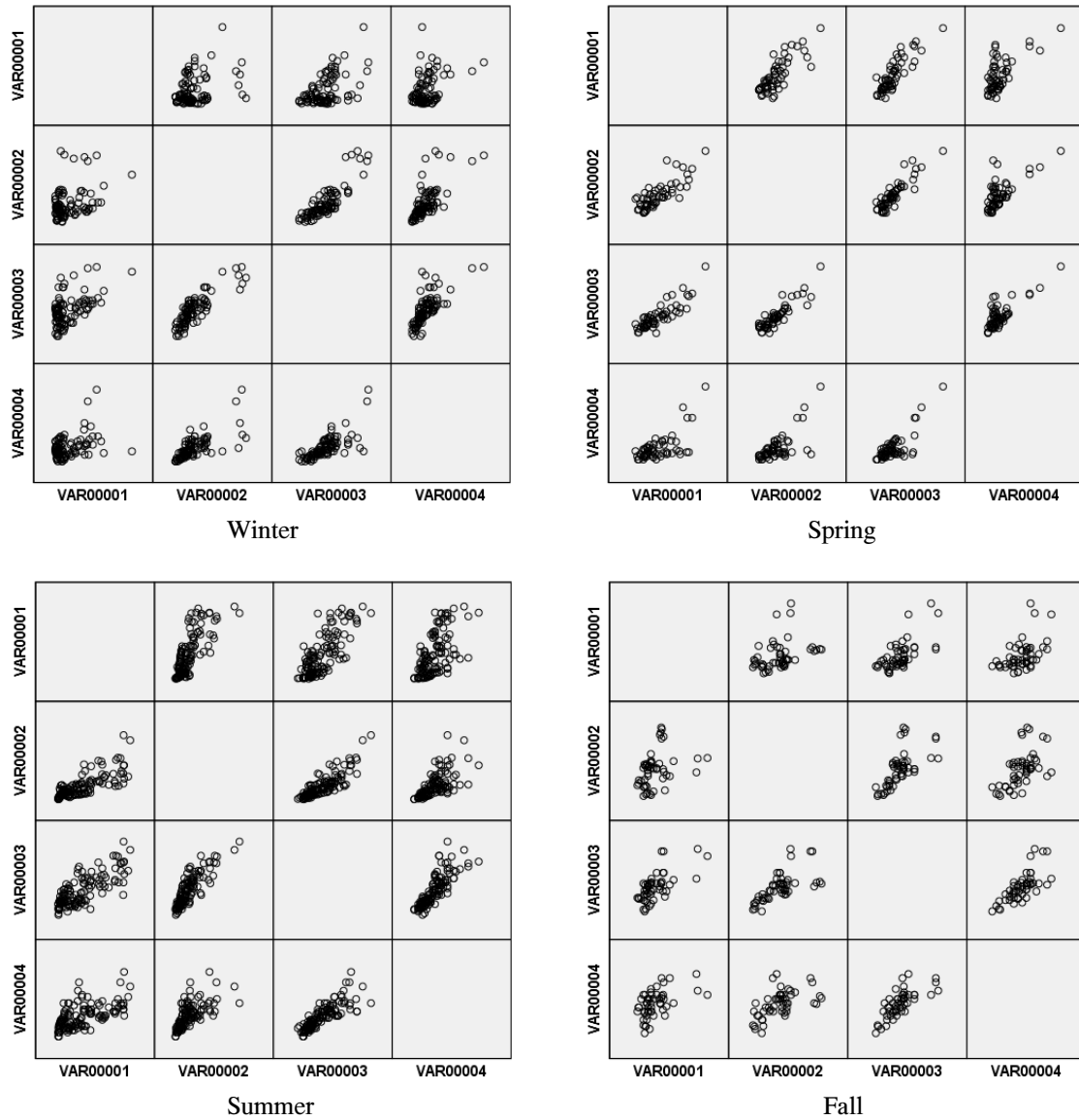


Fig. 7. Seasonal scatter plot of levoglucosan, PM2.5, OC, EC.

발령과 서울형 비상저감 조치가 함께 발령된 경우 광진 자료를 이용하였다. 초미세먼지 주의보는 PM2.5 시간당 평균농도가 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속될 때 발령되며, 서울형 비상저감조치의 발령 기준은 당일 0~16시 PM2.5 평균농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과되면서 익일 예보가 나쁨($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과할 때 발령된다. 2018년에는 3월 26일과 11월 7일 서울형 비상저감조치가 각각 발령되었다. 각각의 기간 전후로 PM2.5와 레보글루코산의 농

도변화는 그림 8, 9와 같다.

3월 초미세먼지 고농도의 기간에 레보글루코산의 농도 경향을 보면 고농도가 시작되는 시점(21일)에 전날 대비 5.9배로 크게 증가했다. 그리고 고농도가 발생하는 기간(22일~26일)에는 레보글루코산의 농도는 $67.4 \sim 80.1 \text{ ng}/\text{m}^3$ 으로 PM2.5의 경향에 따라 급격히 증가하지 않고 비교적 일정하게 유지하는 것을 볼 수 있었다. 서영화 등은 미세먼지의 농도가 급속하게 오르기 하루 전부터 레보

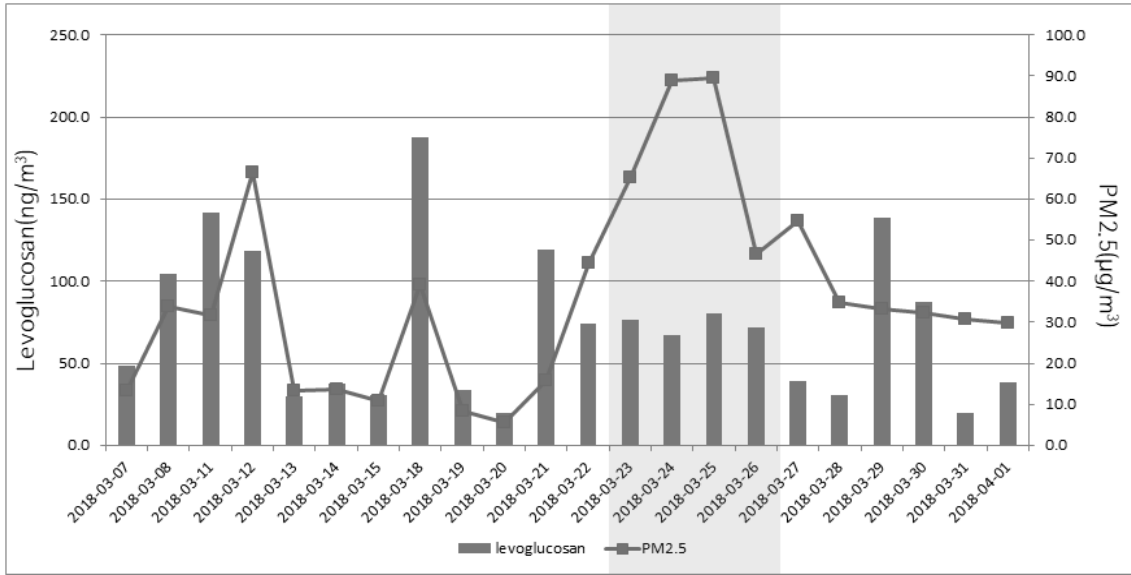


Fig. 8. Concentration of PM2.5 and levoglucosan in March.

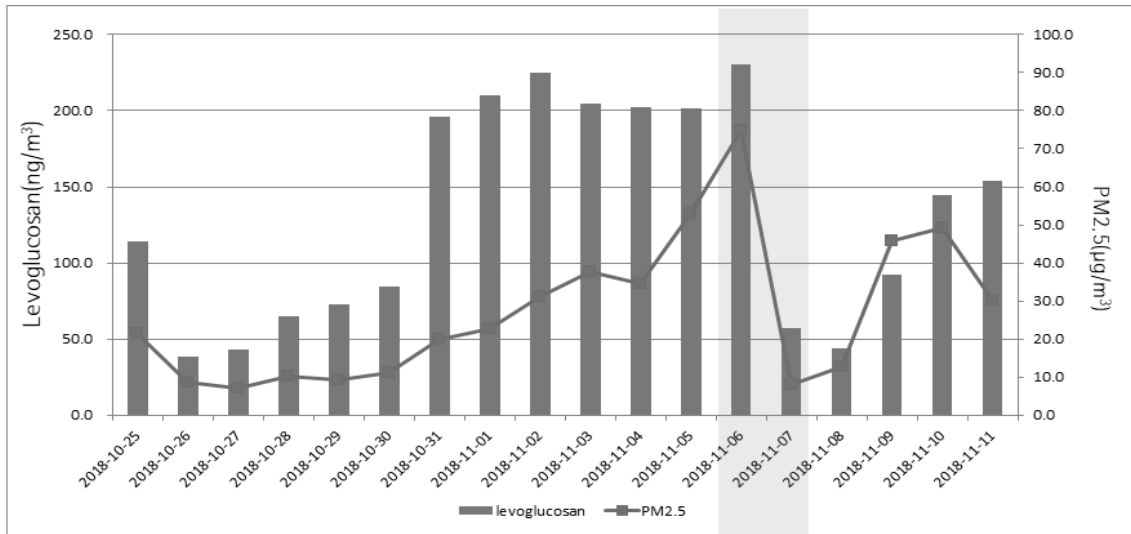


Fig. 9. Concentration of PM2.5 and levoglucosan in November.

글루코산의 농도가 급속하게 높아진다고 하였는데 3월의 초미세먼지 고농도 발생시기에는 이전 연구 결과와 유사한 경향을 보인 것으로 나타났다(7).

그러나 2018년의 또 한 번의 고농도 사례인 11월의 경우에는 조금 다른 농도 경향을 보였다. 11월의 고농도 미세먼지 농도를 나타내는 기간에는 고농도(6일)를 나타내기 일주일 전(31일) 레보글루코산의 농도가 2.3배로 증가했고, 고농도가 나타

나는 6일까지 일정하게 높은 농도(196.0~230.7 ng/m³)를 유지했으며, PM2.5 고농도 피크치를 나타낸 6일 하루 전날의 레보글루코산의 급격한 농도증가는 나타나지 않았다. PM2.5는 31일부터 서서히 증가하는 경향을 보였으며, 레보글루코산은 31일부터 지속적으로 고농도를 유지했다.

11월은 3월보다 생물성 연소 농도가 높은 달이며, 2018년 1.6~2.0배 정도 높은 농도를 유지했

다. 고농도 사례시에는 11월이 3월보다 평균 2.6 배까지 높은 것으로 나타나 11월이 3월에 비해 생물성 연소의 영향이 컸던 것으로 판단되며, 특히 고농도 사례시, 대기정체로 인한 생물성 연소 지표물질의 연속적인 고농도가 PM2.5의 고농도에 영향을 미친 것으로 보여진다.

본 연구에서는 2018년 단 2차례의 고농도 사례에서 레보글루코산의 농도 경향을 살펴본 것으로, 보다 장기적으로 여러 차례의 고농도 사례 연구를 통해 레보글루코산의 농도특성을 알아볼 필요성이 있다고 판단된다.

결 론

1. 분석법의 신뢰도 검증을 위해 내부정도관리를 수행하였으며, 그 결과 검량선 직선성 0.99 이상, 정밀도 10% 이내, 정확도 20% 이내 기준 만족하여, 분석결과 신뢰도를 확보하였다. 레보글루코산의 대기 중 검출한계농도는 0.1 ng/m³, 대기 중 정량한계는 0.3 ng/m³, 마노산은 검출한계 0.3 ng/m³, 정량한계 0.9 ng/m³, 갈락토산은 각각 0.1 ng/m³, 0.4 ng/m³이다.
2. 2018년 레보글루코산의 농도범위는 종로 18.6~211.5 ng/m³, 광진 17.7~216.4 ng/m³, Mannosan은 종로 1.4~26.6 ng/m³, 광진 1.4~31.2 ng/m³, Galactosan은 종로 0.7~26.8 nng/m³, 광진 0.6~26.8 ng/m³으로 농업 잔재물 소각, 산불 등 생물성 연소가 많은 겨울이 농도가 높고, 여름의 농도가 낮은 전형적인 패턴을 보여주었다.
3. 레보글루코산에 대한 계절 분포특성은 겨울철 PM2.5, OC, EC의 상관성은 높으며, 봄과 여름은 낮은 것으로 나타나, 겨울철의 초미세먼지 농도변화에 미치는 생물성 연소의 영향이 큰 것으로 파악되었다. 계절별로 PM2.5에 미치는 생물성 연소의 기여도는 차이를 나타냈으며, 특히 겨울철 초미세먼지의 관리를 위해서는 생물성 연소의 제어가 초미세먼지 농도저감에 효과가 있을 것으로 판단되었다.
4. 초미세먼지 고농도 사례시 레보글루코산의 농

도변화는 3월과 11월이 서로 다른 경향을 나타내었다. 3월은 초미세먼지 농도가 높아지기 하루 전 레보글루코산의 농도가 급격히 증가하는 경향을 나타냈으나, 11월 고농도시에는 하루 전 급격한 농도 증가없이 초미세먼지가 증가하는 기간동안 고농도의 레보글루코산의 농도를 유지하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 2018년 자료를 중심으로 분석함으로써 데이터의 부족으로 인한 해석의 한계가 있을 수 있어, 이를 보완하기 위해 장기적인 데이터 수집을 통한 분석 및 평가를 지속적으로 수행함으로써 향후 서울시 생물성 연소에 대한 계절별 대기오염도 제어 정책 방안에 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. 서울특별시 : 초미세먼지(PM-2.5)배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구, 2016.
2. Simoneit, BRT, Schauer, JJ, Nolte, CG, Oros, DR, Elias, VO, Fraser, MP, Rogge, WF and Cass, GR : Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles. Atmospheric Environment, 33:173~182, 1999.
3. Jung JS, Lyu, YS, Lee, MH, Hwang, TK, Lee, SI and Oh SH : Impact of Siberian forest fires on the atmosphere over the Korean Peninsula during summer 2014. Atmos. Chem. Phys., 16: 6757~6770, 2016.
4. Jung, JS, Lee, DH, Jeong, HJ, Lee, SI and Oh SH : Chemical characterization of the long-range transport of firework/firecracker emissions over the Korean Peninsula: A novel indicator of Asian continental outflows. Atmospheric Environment, 178:223~230, 2018.
5. 서영화 : Deuterated isotope standard dilution mass spectrometry 분석 방법에

- 의한 Levoglucosan의 정량 연구. 환경관리학회지, 105~113, 2012.
6. Jung, JS, Lee, SI, Kim, HS, Kim, DY, Lee, HE and Oh, SH : Quantitative determination of the biomass-burning contribution to atmospheric carbonaceous aerosols in Daejeon, Korea, during the rice-harvest period. Atmospheric Environment, 89: 642~650, 2014.
 7. 서영화, 정권 : 서울시 고농도 PM10과 PM2.5 발생시 levoglucosan과의 상관관계, 환경관리학회지, 19(1):1~10, 2013.
 8. Zhang, T, Cao, JJ, Chow, JC, Shen, ZX, Ho, KF, Steven, S, Ho, H, Liu, SX, Han, YM, Watson, JG, Wang, GH and Huang, RJ : Characterization and seasonal variations of levoglucosan in fine particulate matter in Xi'an, China. J. of the Air & Waste Manage. Assoc, 64(11): 1317~1327, 2014.
 9. 김효선, 정진상, 이진홍, 이상일 : 대전지역 대기 중 PM2.5의 유기탄소와 원소탄소의 계절별 특성 연구. 한국대기환경학회지, 31(1): 28~40, 2015.