

Physicochemical properties of deposited particles on surface of pine leaves as biomarker for air pollution

David Chung, Jeong-Heui Choi, Jang-Ho Lee[★], Soo-Yong Lee, Ha-Eun Lee, Ki-Wan Park, Kyu-Young Shim, and Jong-Chun Lee

National Institute of Environmental Research, Natural Environment Research Division, Incheon 22689, Korea

(Received October 8, 2018; Revised December 5, 2018; Accepted December 6, 2018)

솔잎가지 표면에 침착된 입자상 물질의 물리화학적 특성 및 대기오염 지표로서의 가능성 고찰

정다위 · 최정희 · 이장호[★] · 이수용 · 이하은 · 박기완 · 심규영 · 이종천

국립환경과학원 환경자원연구부 자연환경연구과
(2018. 10. 8. 접수, 2018. 12. 5. 수정, 2018. 12. 6. 승인)

Abstract: The purpose of the present study was to investigate whether the degree of air pollution can be evaluated via examination of local plants. Selected sites included two parks in an industrial area, as well as two parks in an urban area. Selected plant samples comprised one-year-old pine shoot leaves. Leaves growing over 2 m from the ground were collected from over 10 pine trees. Leaf surface was analyzed for deposition of 14 trace elements and 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), including particle size and mass, surface imaging, precipitation-mediated particle removal rate, and concentration. Particle size ranged from 0.4 to 200 μm , and the volume percentage of particles ≤ 10 was 20 %. Deposited particle mass ranged from 0.450-0.825 mg, and precipitation-mediated removal rate ranged from 10.0-27.6 %. Trace element concentration, as measured by ICP/MS after microwave acid digestion, was 18.8-26.3 mg/kg As, 0.08-0.13 mg/kg Be, 0.06-0.08 mg/kg Cd, 4.91-17.8 mg/kg Cr, 5.26-405 mg/kg Cu, 1,930-2,670 mg/kg Fe, 3.03-28.1 mg/kg Pb, 26.9-42.8 mg/kg Mn, 2.66-10.4 mg/kg Ni, 4,560-8,730 mg/kg Al, 2,500-6,120 mg/kg Ba, 5.27-17.8 mg/kg Rb, 40.9-95.3 mg/kg Sr, and 4,030-8,260 mg/kg Zn. Concentration of PAHs, as analyzed by GC/MS/MS after liquid-liquid extraction and purification of deposited particles, ranged from 1.17 to 12.378 mg/kg for ΣPAH_{16} and from 1.17 to 12.378 mg/kg for ΣPAH_7 .

요약: 본 연구는 대기오염 영향에 따라 주변의 오염도를 식물로 평가할 수 있는 여부를 고찰하기 위한 연구이다. 국내 자생하는 소나무의 1년생 솔잎가지를 대상 평가지표로 선택하였으며, 채취지점은공단지역 주변의 공원 2곳, 상대적으로 오염원이 적다고 예상되는 도시지역 공원 2곳을 선정하였다. 대상

[★] Corresponding author

Phone : +82-(0)32-560-7590 Fax : +82-(0)32-561-7087

E-mail : ficedula01@korea.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

채취지점에서 소나무 10 그루 이상에서 지상 2 m 이상의 솔잎가지를 채취하였다. 채취한 솔잎가지 표면에 침착된 입자상 물질에 대한 분석항목은 입도분포, 전자현미경의 표면촬영, 먼지제거율, 납 등 중금속, 다환방향족탄화수소류(PAHs) 유기물질이었다. 초음파를 이용하여 탈착시킨 침착된 입자상 물질의 입도는 0.4 μm ~200 μm 범위로 나타났고, 10 μm 이하의 입도는 20% 수준이었다. 솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 양은 평균 0.636 mg (0.450 mg~0.825 mg) 이었고, 강수장치에 의한 제거율은 평균 18.8% (10.0%~27.6%)로 나타났다. 고주파전처리장치로 산전처리한 후 ICP/MS로 측정된 입자상 물질의 중금속 농도는 As 18.8~26.3 mg/kg, Be 0.08~0.13 mg/kg, Cd 0.06~0.08 mg/kg, Cr 4.91~17.8 mg/kg, Cu 5.26~405 mg/kg, Fe 1,930~2,670 mg/kg, Pb 3.03~28.1 mg/kg, Mn 26.9~42.8 mg/kg, Ni 2.66~10.4 mg/kg, Al 4,560~8,730 mg/kg, Ba 2,500~6,120 mg/kg, Rb 5.27~17.8 mg/kg, Sr 40.9~95.3 mg/kg, Zn 4,030~8,260 mg/kg 범위이었다. 침착된 입자상 물질의 세척액을 액-액 추출-정제한 후 GC/MS/MS로 분석한 PAHs의 농도는 ΣPAH_{16} 은 1.179~12.396 mg/kg, ΣPAH_7 은 0.147~0.741 mg/kg 범위이었다.

Key words: dust, pine, needles, shoot, sheath, particle size, weight of deposited particles, ICP/MS, GC/MS/MS, trace elements (As, Be, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni, Al, Ba, Rb, Sr, Zn), PAHs

1. 서 론

현재 우리나라의 환경오염을 평가하는 방법은 대기, 물, 토양 등의 환경매체를 통해 오염도를 측정하고 해당 매체의 환경기준에 따라 초과 여부를 판단한다. 또한 환경매체에 대한 평가항목의 환경기준을 개정하거나 확대하는 방식으로 환경개선 등의 정책적 대응을 해 나가고 있다. 그러나 최근에는 동식물을 이용하여 오염물질이 인간에게 영향을 미칠 수 있는 범위 또는 영향 가능성을 보다 가시적으로 보여주는 연구를 환경시료은행을 중심으로 진행하고 있다.^{1,4}

국내에서는 사람의 먹거리와 관련한 동식물에 대해서는 식약처 또는 농수산부 등에서 안전한 기준을 제시하고 관리하고 있지만, 직접적인 먹거리가 아닌 동식물의 경우에는 관리체계가 매우 미비한 상황이다. 실제로 인간의 화학물질 생산·사용·폐기 등의 활동으로 동식물에 대한 오염물질의 영향 여부를 정량적으로 평가하고 관리하는 기준은 없다. 환경보건법은 사람을 포함한 동식물을 오염물질에 영향을 받을 수 있는 수용체로 정의하고 있고 환경매체를 통해 수용체가 받을 수 있는 영향을 조사하도록 하고 있지만, 사람에 대해서만 기초조사 또는 역학조사가 일부 이루어지고 있을 따름이다.⁵ 관련법에 따라 환경유해인자가 생태계에 미치는 영향 및 피해에 대한 사항, 수용체 중심의 통합적 환경기준 마련 등이 진행되어야함에도 불구하고 아직까지는 어린이 등 민감계층 중심의 조사연구가 우선적으로 진행되고 있는 것이 현실이다.⁶ 현실적으로 사람에 대한 정밀조사가 매우 제한

적인 것을 고려할 때, 동식물을 이용한 오염도 평가는 사람에 대한 간접적인 모니터링이 될 수 있으며, 건강한 생태계 여부를 판단할 수 있는 좋은 생물지표도 될 수 있다.

우리나라를 포함하여 선진국의 환경시료은행들은 동식물을 포함한 오염도 평가연구를 수행하고 있다. 우리나라도 2009년 환경부가 환경시료은행을 준공한 이후부터 동식물 환경시료를 모으고 있으며, 생태계의 건강성을 나타내는 생물지표로서의 활용성을 높이기 위해 관련 연구를 수행하고 있다.⁷⁻¹⁴ 수목시료는 환경오염도를 대변할 수 있는 생물지표로서 소나무와 같은 침엽수의 나뭇잎으로 중금속, 다환방향족탄화수소류(PAHs) 등의 대기오염물질을 많은 연구자들이 조사하였다.^{20-22,27,28} 수목 시료의 나뭇잎을 이용하여 일반지역의 오염도, 계절적인 오염도 변화, 특정 시설 주변의 오염도 등을 평가하는 수동형 채취기(passive sampler)로서의 활용성을 검토하였다.^{15-26,29-32} 나뭇잎에 침착된 입자상 물질 중 오염물질의 조사는 대부분 나뭇잎을 세척한 것과 세척하지 않은 시료를 비교하는 간접적인 방법이다.^{20,33,34} 또는 잎에 침착된 입자상 물질의 특성을 조사하기 위해 잎의 표면을 엑스레이로 분석하거나 침착된 입자상 물질을 세척하여 그 세척액을 통해 Al, As, Cd, Cu, Fe, Pb, Zn 등의 미량금속 농도를 조사한 연구도 있다.³⁵⁻³⁸ 국내에서는 대기측정망에서 대기 오염도를 평가하기 위하여 입자상 물질을 펌프로 포집하여 납(Pb)을 포함한 중금속 9종과 Benzo(a)pyrene 등 PAHs 7종을 정기적으로 모니터링하고 있다. 이와 연계하여 나뭇잎에 침착된 입자상 물

질의 고찰은 의미있는 연구일 것이다.³⁹

본 연구에서는 소나무 솔잎가지를 이용하여 대기 오염도를 평가할 수 있는 가능성을 고찰하였다. 솔잎 가지 표면에 침착되어 있는 입자상 물질을 분리하여 입자상 물질의 침착량, 입도분포 등의 물리적 특성과 중금속, PAHs 등의 화학적 특성 조사를 하였다. 이러한 조사를 통해 솔잎에 침착된 입자상 물질이 대기 오염도를 평가할 수 있는지, 적절한 분석항목은 무엇인지 등의 고찰로 생물지표로서의 가능성을 검토하였다. 본 연구를 통해 환경오염 수준을 대기, 물, 토양 등과 같은 환경매체 외에도 식물 수용체와 같은 생물지표가 활용될 수 있다는 인식이 확산되기를 기대한다.

2. 방 법

2.1. 시료채취 및 조제

국내 자생하는 소나무의 1년생 솔잎가지를 대상 평가지표로 선택하였으며, 채취시기는 2018년 4월 9일~4월 20일이었다. 채취지점은 공단지역 주변의 공원 2곳, 상대적으로 오염원이 적다고 예상되는 도시지역 공원 2곳을 선정하였다. 각 채취지점에서 소나무 10 그루 이상을 대상으로 지상 2 m 이상 높이의 솔잎가지를 채취하였다. 각 지점별로 채취한 솔잎의 물성 조사항목은 솔잎의 개수, 솔잎의 무게, 솔잎에 침착된 입자상 물질의 무게, 솔잎 표면에 침착된 입자상 물질의 형태 등이었다. 입자상 물질의 분석항목에 따른 세부적인 시료조제에 대한 사항은 '2.3 실험조건 및 절차'에서 자세히 기술하였다. 채취한 솔잎가지 표면에 침착된 입자상 물질을 이용하여 입도, 먼지제거율, 중금속, PAHs 등을 분석하였다.

2.2. 시약, 초자, 분석기기

2.2.1. 시약 및 초자

실험에 사용한 정제수는 저항 값이 18 MΩ에 해당하는 3차급을 이용하였으며, 세척 또는 산(acid) 처리를 위한 질산은 Sigma-Aldrich ACS급을 사용하였다. 유기오염물질 분석을 위한 초자 세척, 시료의 추출·정제 등을 위해서 사용하는 유기용매의 경우는 acetone은 Merck의 GC급(99.8%), hexane은 Merck의 GC급(98.0%), dichloromethane은 J.J. Baker의 LC급(99.8%), Isopropanol은 Sigma-Aldrich의 ACS급(99.5%)을 사용하였다. 분석에 사용한 표준용액의 경우는 중금속은 Perkin-Elmer의 1,000 mg/L 농도를 단계적으로 희석하여 사용하였고, PAHs는 Accustandard (H-QME-01,

USA)의 1,000 mg/L 농도를 희석하여 사용하였다. PAHs의 내부표준용액은 Accustandard (M-525-IS, USA)의 500 mg/L 또는 2,000 mg/L 농도를 희석하여 사용하였다. 분석에 사용하는 초자는 내부 세척 절차에 따라 중금속과 관련한 플라스틱, 유리 등의 초자류는 계면활성제, 산, 정제수를 이용하여 세척·건조하여 사용하였다. 유기물질 분석에 관련한 유리, 금속 등의 초자류는 아세톤, 헥산 등의 유기용매와 증류수를 이용하여 세척·건조하여 사용하였다. 또한 모든 초자류는 세척, 건조한 후 분석 전까지 밀폐용기에 보관하였다.

2.2.2. 분석기기

솔잎의 무게, 흡착먼지의 무게는 최소 측정범위 0.1 mg 수준의 정밀전자저울(Satorius, DE/Quintix125D)을 이용하여 측정하였다. 솔잎 표면은 Carl Zeiss의 전자현미경(FESEM, SUPRA 55VP)을 이용하여 입자상 물질, 표면기공을 관찰하였고, 시편 제작을 위한 표면전처리는 Leica의 백금코팅기(EM ACE200)를 이용하였다. 솔잎 침착 입자상 물질의 입도는 Branson의 초음파세척기(US/5510-EDTH)를 이용하여 제거한 입자상 물질을 비커에 담아 Malvern의 입도분석기(Mastersizer 2000)를 이용하여 측정하였다. 납(Pb) 등의 중금속 측정은 CEM의 고주파전처리장치(MARS 6)를 이용하여 산분해 한 후 Perkin-Elmer의 ICP/MS(Elan DRC-e)로 분석하였다. 다환방향족탄화수소류(PAHs)는 액·액 추출장치를 이용하여 전처리한 후 Agilent의 GC/MS/MS (7890B/7000D)로 분석하였다.

2.3. 실험 조건 및 절차

2.3.1. 솔잎 개수와 무게

솔잎(needle)의 개수는 솔잎가지(shoot) 30 개를 단위로 솔잎의 개수를 세어 솔잎가지당 평균 개수를 산출하였다. 솔잎과 솔잎싸개(sheath)의 단위 무게는 솔잎가지를 각각 분리하여 솔잎과 솔잎싸개의 무게를 측정하였다. 솔잎의 단위 무게는 솔잎 총 무게에 솔잎의 평균 개수를 나누어 평균 무게를 계산하였고, 솔잎싸개의 단위 무게는 솔잎싸개 총 무게를 솔잎싸개의 총 개수로 나누어 평균 무게를 산출하였다.

2.3.2. 침착 입자상 물질의 입도

시료채취 지점별로 솔잎가지 30 개를 준비하여 마개가 있는 유리병에 증류수 800 mL와 함께 담아 초음파세척기에 넣어 5분 동안 초음파를 가한 후 200 μm 체로 여과하여 1 L 비커에 담았다.

시료가 담긴 비커를 입도분석기 시료 주입기에 장착한 후에 교반속도를 1,800 rpm~1,900 rpm으로 설정하고 약 1분간 시료를 순환한 후에 입도 측정을 시행하였다. 시료의 입도 측정은 시료당 10회 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

2.3.3. 솔잎의 표면분석

솔잎 표면은 입자상 물질이 침착된 솔잎, 초음파세척기로 먼지를 탈착시킨 솔잎 시료를 각각 구분하여 전자현미경으로 관찰하였다. 전자현미경 관찰을 위한 시편 제작은 솔잎을 적당한 크기로 잘라 백금코팅기에 넣어 200초 동안 코팅한 후에 시편을 전자현미경에 장착하여 3,000 배율로 촬영하였다. 주로 솔잎 표면의 기공과 먼지를 관찰하였다.

2.3.4. 침착 입자상 물질의 무게

시료채취 지점별로 솔잎가지 30개를 준비하여 마개가 있는 유리병에 증류수 800 mL와 함께 담아 초음파세척기에 넣어 5분 동안 초음파를 가한 후 200 μm 체로 여과하여 2 L 수조에 담았다. 유리병 내벽 또는 솔잎가지에 잔류하는 먼지를 제거하기 위해 증류수로 여러 번 씻어내어 동일한 수조에 담았다. 수조에 담긴 시료를 미리 무게를 측정된 GF/F 여과지를 이용하여 감압 여과하였다. 감압 여과한 여과지를 105 °C 건조기에서 1 시간동안 가열시킨 후 데시케이터에서 30분간 식혔다. 식힌 여과지의 무게를 전자저울로 측정후 여과지의 초기 무게와의 차이를 이용하여 먼지의 무게를 계산하였고, 솔잎의 개수를 이용하여 솔잎 개별 입자상 물질의 양을 계산하였다.

2.3.5. 침착 입자상 물질의 제거율

솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 제거방법은 강수장치를 이용한 방법, 진탕기에 의한 방법, 초음파 세척기를 이용한 방법을 사용하였다. 강수장치는 KS C 0281에 따른 '보통의 비'의 조건을 적용하여 증류수와 솔잎이 접촉한 액상 시료를 모으는 장치이다. 강수장치는 시간당 4 mm, 빗방울의 지름은 0.5~1.0 mm, 빗방울의 떨어지는 속도는 1~2 m/s 조건으로 제작하였다. 강수장치를 이용하여 솔잎가지에서 분리된 입자상 물질을 추출한 시료를 수조로 옮겨 담는다.

진탕기에 의한 방법은 일정량의 솔잎가지를 유리병에 넣고 증류수 800 mL를 채운 후 진탕향운수조에서 150 rpm으로 2분간 왕복 진탕하여 입자상 물질을 제거하는 방법이다. 왕복 진탕한 후에 유리병 내 솔잎가

지에서 분리된 입자상 물질을 추출한 시료를 수조로 옮겨 담는다. 초음파 세척기에 의한 방법은 일정량의 솔잎가지를 유리병에 넣고 증류수 800 mL를 채운 후 초음파 세척기 수조에 담아 5분간 초음파를 가하여 먼지를 제거하는 방법이다. 초음파 세척 후에 유리병 내 솔잎가지에서 추출한 입자상 물질 시료를 수조로 옮겨 담는다.

각각의 먼지 제거방법에 따라 얻은 액상 시료를 미리 무게 측정된 GF/F 여과지를 이용하여 감압 여과하였다. 감압 여과한 여과지를 105 °C 건조기에서 1 시간동안 가열하고 데시케이터에서 30분간 식힌 후에 여과지의 무게를 전자저울로 측정하여 입자상 물질의 무게를 계산하였다. 솔잎가지에서 탈착한 입자상 물질의 제거율은 초음파 세척으로 제거한 입자상 물질을 총량으로 정하고 강수장치와 진탕기 방법에 의한 먼지 제거율을 계산하였다.

2.3.6. 중금속 농도

솔잎가지를 세척하여 먼지를 포함한 여과지는 고주파전처리장치를 이용하여 산전처리한 후 ICP/MS로 측정하였다. 고주파전처리장치를 이용한 산전처리는 여과지 전체를 시료로 취하여 질산 9 mL와 함께 분해용기에 넣고 180 °C까지 온도를 올렸다. 산전처리 후에 분해용기를 실온에서 충분히 냉각시켜 분해액을 정제수로 씻어 내며 여과하여 최종 부피를 20 mL에 맞추었다. 솔잎가지의 세척과정에서 여과지를 통과한 액상 시료는 별도의 전처리 과정없이 질산을 첨가하여 2% 농도 수준에 맞추어 ICP/MS로 측정하였다. ICP/MS 측정을 위한 기기조건은 Table 1에 플라스마 점화 및 시료주입 조건 등을 나타냈으며, 분석항목 14 종에 대한 정량용 질량(m/z)은 Table 2와 같다.

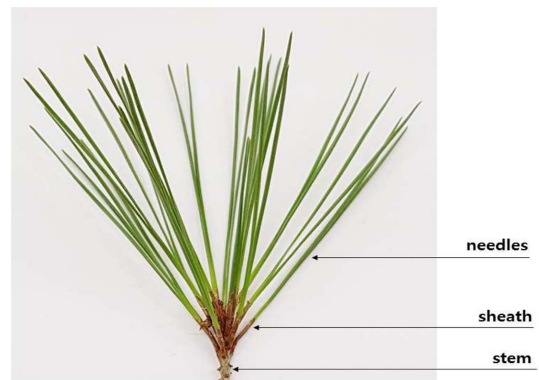


Fig. 1. 1st-year shoot of pine leaves.

Table 1. Analytical parameters of ICP/MS

Parameter	Condition	
RF Power	1200 W	
Argon gas (99.999 %)	Plasma gas flow	17 L/min
	Auxiliary gas flow	1.5 L/min
	Nebulizer gas flow	1.07 L/min
CH ₄ gas (99.999 %)	Plasma gas flow	0.6 L/min
Spray chamber	Double pass type (scott type)	
Nebulizer	Cross flow type	
Mass analyzer	Quadrupole	
Dwell time	50 ms	
Sweeps	25 seconds	
Reading	1 cycle	
Replicate	3 cycles	
Scan mode	peak hopping	

Table 2. Quantitative mass of elements by ICP/MS

Elements	m/z	Elements	m/z
Arsenic (As)	75	Manganese (Mn)	55
Beryllium (Be)	9	Nickel (Ni)	60
Cadmium (Cd)	111	Aluminium (Al)	27
Chromium (Cr)	52	Barium (Ba)	138
Copper (Cu)	63	Rubidium (Rb)	85
Iron (Fe)	56	Strontium (Sr)	88
Lead (Pb)	208	Zinc (Zn)	66

Table 3. Analytical parameters of GC/MS/MS

The part of gas chromatograph	
Column	DB-5MS UI (cross-linked 5 % phenyl methyl silicon, 60 m × 0.25 mm I.D. × 0.25 μm film thickness)
Inlet	310 °C
Oven	70 °C (2 min) → 20 °C/min → 240 °C (2 min) → 5 °C/min → 310 °C (23.5 min)
Carrier gas & flow rate	He, 1.2 mL/min
Injection mode	Pulsed splitless
Injection volume	1.5 μL
The part of mass spectrometry	
Ion source Temp.	250 °C
Transfer line	310 °C

2.3.7. 다환방향족탄화수소류(PAHs)의 농도

다환방향족탄화수소류(PAHs)는 솔잎가지를 초음파 세척하여 얻은 시료를 유기용매로 액-액 추출하여 농축한 후 GC/MS/MS로 분석하였다. 시료의 용매추출은 시료 전체를 2 L 분별깔때기에 넣고 dichloromethane/n-hexane 혼합액(15:85, v/v)을 1차에는 50 mL, 2차에는 25 mL를 넣고 흔들어 추출하였다. 각각의 추

Table 4. Quantitative and qualitative mass of PAH compounds by GC/MS/MS

IUPAC NAME	Abbr.*	M.W.	Quantitative	Qualitative	IDL* (mg/L)
			m/z (eV)	m/z (eV)	
Naphthalene	Naph	128.18	102 (40)	77 (45)	0.001
Acenaphthylene	AcPy	152.20	150 (5)	76 (50)	0.005
Acenaphthene	Acp	154.20	152 (50)	77 (55)	0.005
Fluorene	Flu	166.23	139 (50)	115 (50)	0.001
Phenanthrene	Phen	178.24	176 (40)	151 (40)	0.001
Anthracene	Ant	178.24	176 (40)	151 (40)	0.005
Fluoranthene	Flt	202.26	200 (45)	150 (50)	0.001
Pyrene	Pyr	202.26	200 (50)	150 (50)	0.001
Benzo(a)anthracene	BaA	228.30	226 (40)	200 (55)	0.002
Chrysene	Chry	228.30	226 (40)	200 (55)	0.005
Benzo(b)fluoranthene	BbF	252.32	250 (50)	224 (55)	0.001
Benzo(k)fluoranthene	BkF	252.32	250 (50)	224 (55)	0.001
Benzo(a)pyrene	BaP	252.32	250 (50)	224 (55)	0.001
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Ind123	276.34	274 (50)	248 (50)	0.003
Dibenz(a,h)anthracene	DahA	278.36	276 (50)	250 (50)	0.003
Benzo(ghi)perylene	BghiP	276.34	274 (50)	248 (50)	0.002

*Abbr. : Abbreviation

*IDL : Instrument Detection Limit

출용매를 합한 후에 isopropanol을 1 mL, 포화식염수 50 mL, 내부표준물질(0.5 mg/L, 0.2 mL)을 첨가하였다. 내부표준물질로는 acenaphthene-d10, chrysene-d12, perylene-d12, phenanthrene-d10, p-terphenyl-d14를 사용하였다.

추출용매의 농축은 회전식증발농축기로 약 1 mL가 될 때까지 감압농축(bath 온도 : 30 °C)한 후, 농축액과 기벽은 n-hexane과 파스퇴르 피펫을 이용하여 15 mL 유리시험관에 옮겨 0.5 mL가 될 때까지 질소농축기로 증발시켰다. GC/MS/MS 측정을 위한 시료액의 최종 부피는 isopropanol을 첨가하여 정확히 0.5 mL로 맞추었다. PAHs 측정을 위한 GC/MS/MS의 기기조건은 Table 3에 오븐프로그램과 컬럼종류 등을 나타냈으며, 분석항목 16 종에 대한 정량 및 정성 질량(m/z)은 Table 4와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 솔잎가지의 생체특성

솔잎가지의 생체특성은 Table 5에 나타난 것과 같이 솔잎의 개수는 평균 49개(46개~52개)이었다. 솔잎가지의 무게는 평균 0.939 g(0.779 g~1.040 g), 솔잎의 개당 무게는 평균 0.017 g(0.014 g~0.019 g), 솔

Table 5. Characteristics of pine leaves by sampling site

Location	Number ¹⁾		Weight ²⁾ (g)		
	Needles	Sheath	Shoot	Needle	Sheat
PG	49	1	0.779	0.014	0.113
PK	48	1	1.040	0.019	0.128
PN	52	1	1.011	0.017	0.127
PC	46	1	0.924	0.018	0.096
Average	49	1	0.939	0.017	0.116
STDEV	2.5	-	0.117	0.002	0.015

1) Number : Average Number of needles and sheath in a shoot

2) Weight(g) : Average Weight of a shoot, a needle, and a sheath in pine leaves

잎싸개의 무게는 평균 0.116 g(0.096 g~0.128 g)이었다. 시료채취 조사지점간의 솔잎의 개수, 솔잎가지의 무게 편차는 각각 2.5, 0.117이었다.

3.2. 침착 입자상 물질의 입도

솔잎가지 표면에 침착된 입자상 물질의 입자크기는 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 0.4 μm~200 μm 범위의 분포를 나타냈고, 대부분 10 μm 전후의 입자들이 많은 분포를 차지하였다. 채취지점별로 비슷한 입도 패턴을 보이고 있고, 100 μm 전후의 입도 여부에 따

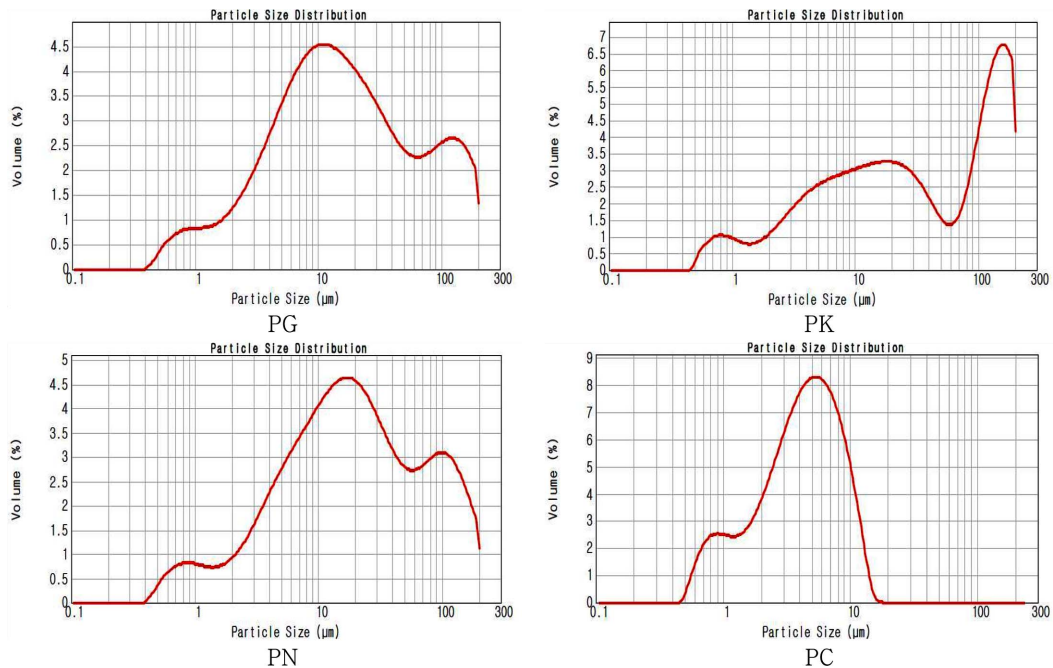


Fig. 2. Distribution of particle size on pine leaves by sampling site.

라 작은 입자의 부피비율이 다소 변화가 있었다. 솔잎에 침착된 입자상 물질의 입도분포는 도시 또는 산업지역 대기 측정결과보다는 큰 입자들의 분포율이 높았다.⁴⁰⁻⁴³ 이는 포집방식이 강제포집이 아닌 passive 형태이고, 일반 대기시료채취기보다는 강수 또는 바람에 장시간 노출, 10 μm 이하의 입자는 기공에 흡수되는 등 다양한 요소에 의한 차이라고 해석하고 있다.⁴⁴⁻⁴⁶ 그러나 대부분의 지역이 10 μm 이하의 미세먼지를 20% 이상을 침착하고 있어 미세먼지 및 주변 오염원에 대한 오염 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단하였다.

3.3. 솔잎의 표면분석

솔잎 표면을 전자현미경으로 촬영한 결과 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 침착되어 있는 입자상 물질들이 관찰되었다. 솔잎 표면은 기공을 중심으로 입자들이 침착되어 있었고 솔잎 싸개 표면은 굴곡진 사이사이에 입자들이 침착되어 있었다. 특히, 물 세척으로 인해 기공에 침착되어 있던 입자가 씻겨 간 것을 관찰할 수 있었다. 또한 솔잎에 침착되어 있는 입자상 물질은 초음파 세척기로 씻기는 어렵지 않았지만 솔잎싸개에 침착되어 있는 입자는 초음파기로도 제거하기가 어려웠다. 이는 솔잎싸개의 거친 표면과 송진 등

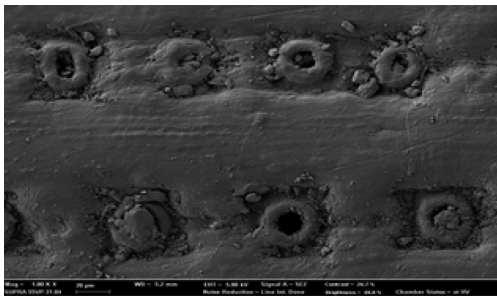
으로 인해 탈착이 어려운 것으로 판단하였다. 전자현미경 사진에서 관찰된 솔잎 기공의 크기가 10 μm~20 μm 범위로 나타나 그 이상의 입자는 기공을 통해 흡수되기는 어렵고 10 μm 이하의 입자들만이 기공을 통해 출입할 수 있을 것으로 추정할 수 있다. 다시 말하면 대기에 있는 가스상과 입자상 물질이 솔잎 기공을 통해 출입이 가능하고, 입자의 경우에는 기공보다 입도가 작은 것만 솔잎 내 축적이 가능할 것이다.

3.4. 침착 입자상 물질의 무게

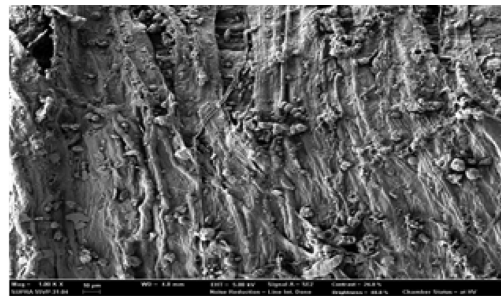
솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 무게는 Table 6에 나타낸 것과 같이 평균 0.636 mg (0.450 mg-0.825 mg)

Table 6. Weight of particle matters on 1st-year shoot of pine leaves by sampling site

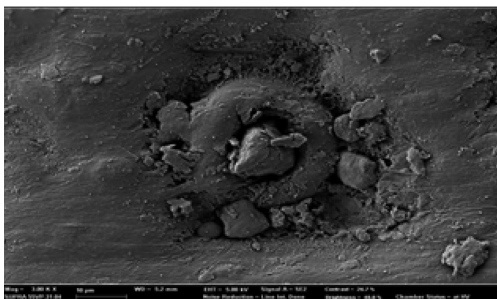
Location	Weight of particles (mg)		
	needles(a)	sheath(b)	shoot(a+b)
PG	0.485	0.340	0.825
PK	0.330	0.160	0.490
PN	0.330	0.120	0.450
PC	0.570	0.210	0.780
Aver.	0.429	0.208	0.636
STDEV	0.119	0.096	0.194



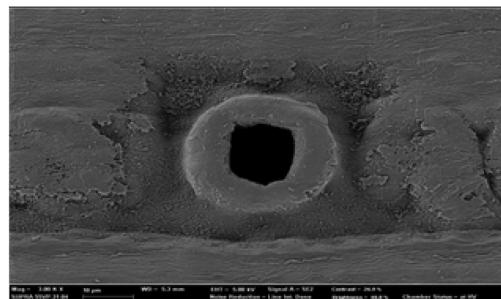
Surface of needle



Surface of sheath



Air hole of needle before washing



Air hole of needle after washing

Fig. 3. Surface image of needle and sheath of pine leaf.

으로 나타났다. 솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 무게는 지역적으로 큰 차이를 보이지 않았고, 솔잎싸개보다 솔잎에 침착된 입자상 물질의 양이 많았다. 소나무에 침착된 입자상 물질을 솔잎가지로 한정하여 계산하면 그루당 0.675 g~1.238 g 범위로 추정할 수 있다. 이는 소나무 한 그루당 솔잎가지를 1,500 개로 가정하였고, 줄기에 침착된 입자상 물질은 고려하지 않고 계산한 값이다. 이러한 계산 값은 소나무 한 그루에 침착된 입자상 물질이 티스푼 1~2 개에 해당하지만, 관점에 따라 소나무가 제거하거나 소나무에 침착할 수 있는 입자상 물질의 양은 다를 수 있다.⁴⁷ 침착된 입자상 물질이 솔잎 표면에서 얼마동안 유지되는지는 뚜렷하게 밝혀지지 않았고, 강수 또는 바람 등에 의해 탈착되었다 침착되는 과정을 반복할 것이기 때문이다. 솔잎을 중심으로 입자상 물질의 침·탈착 순환과정을 좀 더 이해할 수 있으면 보다 명확한 입자상 물질의 침착량을 계산할 수 있을 것이다.

3.5. 침착 입자상 물질의 제거율

진탕기에 의한 침착된 입자상 물질의 제거율은 *Table 7*에 나타낸 것과 같이 평균 62.9% (58.8%~64.4%), 강수장치에 의한 제거율은 평균 18.8% (10.0%~27.6%)로 나타났다. 진탕기에 의한 제거율이 강수장치에 의한 제거율보다 높은 것은 물과 솔잎가지의 접촉시간이나 마찰세기 등의 차이로 판단했다. 강수장치의 특

Table 7. Removal rate of particle matters by washing methods

Location	Rate of removal (%)	
	By shaking	By raining
PG	63.9	-
PK	64.3	-
PN	64.4	10.0
PC	58.8	27.6
Aver.	62.9	18.8

성상 진탕기에 의한 결과가 보다 재현성 있고 제거율이 크다는 결과를 보여주었지만, 비가 내릴 때 기상조건에 따라 솔잎가지가 일률적으로 비에 노출되기는 어려울 것이며, 입자상 물질의 침착 정도에 따라 입자상 물질의 제거 정도가 큰 차이를 보일 것이기 때문에 강수장치의 결과가 보다 현실적일 것으로 판단하였다. 본 연구결과를 통해서 솔잎가지에 침착된 입자상 물질이 강수 등에 의해 일부 씻겨 나갈 수 있고, 기상조건에 따라 씻김정도가 다를 수 있음을 확인하였다.

3.6. 침착 입자상 물질의 중금속 농도

솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 비소(As) 등 14종의 중금속 농도는 *Table 8*과 같이 나타났다. 전반적으로 1 mg/kg을 초과하는 항목은 비소(As), 크로뮴(Cr), 구리(Cu), 철(Fe), 납(Pb), 망가니즈(Mn), 니켈

Table 8. Concentration (mg/kg) of trace elements in particle matters by sampling site

Analytical elements	Location of sampling				Air monitoring ¹⁾	Criteria of Soil ²⁾		Case studies
	City		Industry			1st	2nd	
	PG	PK	PN	PC				
As	26.3	18.8	23.8	21.7	7.50-290	25	50	1.6±0.3 ³⁾ /0.133-0.530 ⁵⁾
Be	0.08	0.10	0.13	0.08	≤ 2.5	-	-	-
Cd	0.08	0.06	0.07	0.06	2.50-85.7	4	10	0.014-0.302 ⁵⁾
Cr	5.30	4.91	8.67	17.8	5.00-359	-	-	0.30-1.43 ⁵⁾ /0.09-0.51 ⁶⁾
Cu	24.1	5.26	21.9	405	45.0-1,680	150	500	30.0±5.0 ³⁾ /0.34-5.14 ⁴⁾ /8.34-16.60 ⁵⁾ /1.21-4.49 ⁶⁾
Fe	2,600	1,930	2,670	2,290	5,720-33,500	-	-	2136±414 ³⁾ /111.75-564.51 ⁵⁾ /16.98-63.43 ⁶⁾
Pb	5.83	3.03	11.7	28.1	258-1,360	200	400	18.0±2.2 ³⁾ /0.84-16.2 ⁴⁾ /1.31-16.01 ⁵⁾
Mn	42.8	26.9	32.4	39.6	191-193	-	-	0.22-0.75 ⁶⁾
Ni	3.31	2.66	4.59	10.4	5.00-339	100	200	0.44-1.20 ⁵⁾
Al	4,560	6,280	8,730	5,140	-	-	-	828±175 ³⁾ /249.62-300.84 ⁶⁾
Ba	2,500	2,580	6,120	3,660	-	-	-	37.3±3.7 ³⁾
Rb	5.27	17.8	9.44	9.06	-	-	-	-
Sr	47.8	40.9	95.3	57.1	-	-	-	108±25 ³⁾
Zn	4,030	7,120	8,260	5,200	-	300	600	311±53 ³⁾ /0.86-16.9 ⁴⁾ /15.70-29.64 ⁵⁾

1)³⁹, 2)⁴⁸, 3)⁵¹, 4)⁵², 5)⁵³, 6)⁵⁴

(Ni), 알루미늄(Al), 바륨(Ba), 루비듐(Rb), 스트론튬(Sr), 아연(Zn)이었으며, 이 중에서 철(Fe), 알루미늄(Al), 바륨(Ba), 아연(Zn) 항목이 1,000 mg/kg 이상의 농도를 보였다. 도시지역보다 공단지역에서 다소 높은 농도를 보이는 항목은 Cr, Pb, Ni, Ba, Sr으로 나타났고, 나머지 항목들은 뚜렷한 지역적 차이를 나타내지 않았다.

국내 대기측정망에서 정기적으로 측정하는 As 등 9종(As, Be, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni)에서 As, Be, Cr, Ni의 농도 수준은 대체적으로 대기측정망 농도와 유사하였다. 그러나 Cd, Cu, Fe, Pb, Mn은 대기측정망 농도보다는 낮은 수준에서 나타났다.³⁹ 대기에서 입자상 물질의 중금속 농도는 공기 시료채취 포집량을 고려해서 입자상 물질의 농도로 환산하였고, 이 계산 값을 본 연구 연구결과와 비교하였다.

솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 중금속은 국내 대기측정망에서 감시하고 있는 항목들 모두가 검출되

었고, 그 외의 Al, Ba, Rb, Sr, Zn 항목들도 높은 농도 수준에서 검출되었다. 이러한 결과는 침착된 입자상 물질을 이용하여 대기 오염도 평가가 가능하고 솔잎가지가 passive sampler로써의 기능도 할 수 있음을 보여주고 있다.^{29,30,35-38}

입자상 물질의 중금속 농도를 토양 오염우려지역 기준과 비교했을 때 Cu, As는 1지역기준을 초과하였고, Zn은 모든 지역기준을 초과하고 있어 소나무가 서식하고 있는 토양에서 유래한 것보다는 외부 오염원의 영향으로 판단하고 있다. 따라서 Zn의 경우는 외부 오염 영향 가능성을 보이고 있어 지역 대기 감시 항목으로 적절하다. 또한, 솔잎가지에 침착된 입자상 물질에서 Cr, Cu, Pb, Ni의 농도가 지역적 차이를 나타내고 있어 대기 오염도를 평가할 수 있는 항목으로 판단하였다.

결과적으로 솔잎가지에 침착된 입자상 물질을 이용하여 지속적인 모니터링이 가능한 항목은 Cr, Pb, Ni,

Table 9. Concentration (mg/kg) of PAHs in particle matters by sampling site

Analytical compounds	Location of sampling				Air monitoring ¹⁾	Case studies
	City		Industry			
	PG	PK	PN	PC		
Naph	0.217	0.444	0.54	1.091	-	-
AcPy	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
Acp	0.202	0.028	0.447	0.432	-	-
Flu	0.482	0.064	1.114	1.812	-	-
Phen	1.087	0.393	5.603	7.711	-	-
Ant	0.019	0.016	0.221	0.143	-	-
Flt	0.016	0.064	0.390	0.448	-	-
Pyr	0.063	0.094	0.392	0.623	-	-
BaA	0.018	0.014	0.035	0.038	2.25-28.8	-
Chry	0.011	0.016	0.028	0.025	5.10-39.6	-
BbF	0.015	0.014	0.023	0.020	4.55-24.9	-
BkF	0.012	0.009	0.026	0.011	2.45-12.0	-
BaP	0.014	0.007	0.020	0.011	2.24-26.9	-
Ind123	0.014	0.007	0.018	0.013	1.50-16.5	-
DahA	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.21-2.65	-
BghiP	0.015	0.009	0.023	0.018	-	-
∑PAH ₁₆	2.185	1.179	8.880	12.396	-	0.347-6.599 ²⁾ /0.106-1.340 ³⁾ 0.127-6.111 ⁴⁾ /0.221-1.552 ⁵⁾
Ave. of ∑PAH ₁₆	1.682		10.638		-	-
∑PAH ₇	0.084	0.067	0.150	0.118	18.3-151.4	-
Ave. of ∑PAH ₇	0.076		0.134		-	-

*∑PAH₁₆ : sum of 16 compounds in PAHs

*∑PAH₇ : sum of 7 compounds (BaA, Chry, BbF, BkF, DahA, BaP, Ind123) in PAHs related to air monitoring in Korea.

1)³⁹, 2)⁵⁵, 3)⁵⁶, 4)⁵⁷, 5)⁵⁸

Cu, As, Zn, Fe, Mn, Al, Ba, Rb, Sr으로 제안할 수 있다.^{20,29,34,35,38,49,50} 그러나 항목별로 검출되는 농도 수준은 파악하였으나 오염원의 영향 정도에 따른 솔잎이 영향을 받는 침착량, 최대 침착할 수 있는 양, 침착시간, 탈착 등에 대한 추가적인 연구들이 필요하다. 이러한 연구들을 통해 솔잎가지에 침착된 입자상 물질이 환경 오염도를 나타내는 환경지표로서의 가능성 및 역할들을 보다 명확히 제시할 수 있을 것이다.

3.7. 침착 입자상 물질의 PAHs 농도

Table 9에 나타난 것과 같이 솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 PAHs 16 종의 합산농도(ΣPAH_{16})는 도시지역에서 평균 1.682 mg/kg (1.179 mg/kg~2.185 mg/kg), 공단지역에서 평균 10.638 mg/kg (8.880 mg/kg~12.396 mg/kg)로 나타났다. 나뭇잎에 침착된 입자상 물질의 PAHs 농도는 국내외 연구사례와도 유사한 농도범위를 보였다.⁵⁵⁻⁵⁸ 개별항목으로는 Naph, Acp, Flu, Phen, Ant, Flt, Pyr이 비교적 높거나 0.1 mg/kg 이상으로 검출되었다. 특히, 공단지역내에서만 0.1 mg/kg 이상 높게 검출된 항목은 Ant, Flt, Pyr이었다. 도시지역과 공단지역에서 공통적으로 0.1 mg/kg 이상의 농도로 검출된 항목은 Naph, Phen이었고, 지역 구분없이 불검출된 항목은 AcPy, DahA이었다. 결과적으로 도시지역과 공단지역간의 PAHs 농도는 분명한 차이가 있었고, 공단지역이 높게 나타났다.

국내 대기측정망은 PAHs 16 종 중 7종(BaA, Chry, BbF, BkF, BaP, Ind123, DahA)을 모니터링하고 있다. 이 감시항목들은 DahA를 제외하고는 입자상 물질에서 모두 검출되었다. PAHs 7종의 합산농도(ΣPAH_7)는 도시지역에서 평균 0.154 mg/kg (0.067 mg/kg~0.084 mg/kg), 공단지역에서 평균 0.642 mg/kg (0.542 mg/kg~0.741 mg/kg)로 나타났다. PAHs 7종 중 도시지역보다 공단지역에서 높게 검출된 항목은 BaA, Chry, BbF으로 나타났다.^{39,59} 입자상 물질의 ΣPAH_7 농도는 국내 측정망 자료인 18.3~151.4 mg/kg 농도범위와 비교했을 때는 매우 낮은 수준으로 나타났으며, 이는 대기측정자료에 사용하는 시험방법이 가스상과 입자상 물질 모두를 강제적으로 포집하여 분석하는 것이기 때문에 이러한 차이가 나는 것으로 해석하고 있다.

본 연구에서의 PAHs 농도값과 토양오염우려지역 기준항목 BaP와 비교했을 때, BaP의 농도범위가 0.007 mg/kg~0.020 mg/kg으로 나타나 관련 환경기준 값(1지역 기준은 0.5 mg/kg)보다는 매우 낮은 수치를 나타냈다. 토양환경보전법에서는 BaP 항목을 철도시

설 주변 토양에 대해서만 조사하는 것으로 규정하고 있어 직접적으로 비교할 수 있는 자료가 적은 편이지만 일부 솔잎 조사와 병행한 토양의 PAHs 연구에서는 흡착면지의 농도와 유사하거나 다소 낮은 농도값을 보였다.⁶⁰ 그러나 솔잎 조사지점에서 토양영향이 적도록 시료채취한 사항이나 채취지점이 철도시설이 아닌 공원지역임을 감안할 때 PAHs 물질은 주변의 자동차, 배출가스 등의 오염원으로부터 영향을 받은 것으로 판단한다.⁶¹

입자상 물질의 PAHs 농도가 도시지역보다 공단지역에서 높은 농도를 보이고 있어 PAHs 물질을 오염도 평가항목으로 고려하는 것은 매우 의미가 있다. 특히, 검출농도가 높고 지역간의 차이를 뚜렷하게 보이는 Naph, Acp, Flu, Phen, Ant, Flt, Pyr 7종 물질은 16 종에서 적합한 항목이다. 또한 화합물을 개별적으로 나타나는 것보다는 대기측정망의 감시항목과 같이 합산농도(ΣPAH_7)로 표현하는 것은 관리적인 측면에서 편리할 것이다. 그러나 솔잎가지에 침착된 입자상 물질은 일반적인 대기모니터링에서 사용하는 포집방법과 달리 솔잎가지에 침착되어 있는 시간이나 수동적인 침착과정 등으로 인해 휘발성 물질이 낮게 평가될 수 있다. 또한 입자상 물질의 크기가 아주 작거나 큰 경우에는 솔잎 침착에 방해가 될 수 있는 점을 고려할 때 대기 오염도 수준을 저평가할 수 있는 가능성이 있다. 그럼에도 불구하고 오염도를 평가할 수 있는 측정방법으로 고려할 수 있는 것은 솔잎가지에 침착된 입자성 물질이 대기 먼지 오염도와 유사성을 보이고, 입자성 물질을 통해 오염도를 평가할 수 있는 가능성이 높다는 것이다. 향후 솔잎가지에 침착된 입자성 물질의 물리적 안정요소, 적절한 시료의 채취시기, 솔잎먼지 중 민감도를 가진 분석항목 등의 물리적 화학적 특성을 보다 정량적으로 표현할 수 있는 연구가 필요하다. 이러한 연구결과를 통해서 대기측정망에서 사용하고 있는 채취와 동등한 기술수준의 방법, 보다 자유로운 지점에서 측정하는 방법, 보다 저비용 분석방법을 사용할 수 있을 것이다.^{31,60}

4. 결 론

솔잎가지에 붙어 있는 솔잎의 개수는 평균 49개이고, 솔잎가지의 무게는 평균 0.939 g, 솔잎 한 개당 무게는 평균 0.017 g이었다. 솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 입자크기는 0.4 μm ~200 μm 범위에서 나타났으며, 입도분포도에 따라 다양한 오염원의 영향을 받

는다. 대기에 있는 입자상 물질은 솔잎 표면에 침착되거나 일부 작은 입자는 기공으로 들어갈 수 있다. 솔잎에 침착된 입자상 물질은 초음파로 제거될 수 있지만 솔잎싸개에 침착된 입자상 물질은 제거가 어려워 입자상 물질을 제거하여 분석해야 하는 경우에는 솔잎에 한정하여 적용해야 한다. 솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 무게는 개당 평균 0.636 mg 이었다. 솔잎가지에 침착된 입자상 물질의 제거율은 강수장치에 의해서 평균 18.8%로 나타나 강수 등에 의해 침착된 입자상 물질이 일부 제거될 수 있음을 확인하였다.

솔잎가지에 침착된 입자상 물질에서 지속적으로 모니터링하기에 적절한 금속류 항목으로는 Cr, Pb, Ni, Cu, As, Zn, Fe, Mn, Al, Ba, Rb, Sr이다. 또한, PAHs 16종에서는 Naph, Acp, Flu, Phen, Ant, Flt, Pyr, BaA, Chry, BbF, BkF, BaP, Ind123, BghiP 14종이다. 끝으로 솔잎가지에 침착된 입자상 물질은 대기 오염도를 나타낼 수 있는 생물지표로서의 가능성이 매우 높다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2014-01-01-070).

References

- H. Rudel, J. Muller, H. Jurling, M. Bartel-Steinbach, and Jan Koschorreck, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **18**, 1457-1470 (2011).
- NORMAN, *Norman Bulletin*, **3**, 1-20 (2012).
- A. Fliedner, H. Rudel, H. Jurling, J. Muller, F. Neugebauer, and C. Schroter-Kermani, *Environ. Sci. Eur.*, **24**(7), 1-15 (2012).
- J. Koschorreck, C. Heiss, J. Wellnitz, A. Fliedner, and H. Rudel, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **22**, 1597-1611 (2015).
- NLIC, Environmental Health Act, Basic Investigations, etc. of National Environmental Health(Article 14) and Epidemiological Investigations, etc. on Environment-Related Harm to Health (Article 15), 2016.
- NLIC, Environmental Health Act, Formulation Environmental Health Master Plans (Article 6), 2016.
- NIER, Application of SOPs in National Environmental Specimen Bank I, 2010.
- NIER, Application of SOPs in National Environmental Specimen Bank II, 2011.
- NIER, Application of SOPs in National Environmental Specimen Bank III, 2012.
- NIER, Application of the Cryogenic Environmental Samples for the Coastal Environment Pollutants Background Monitoring I, 2016.
- NIER, Evaluation of the Measurement Uncertainty from the SOP of the Environmental Specimen Bank I, 2014.
- NIER, Evaluation of the Measurement Uncertainty from the SOP of the Environmental Specimen Bank II, 2015.
- NIER, The Characteristics of Heavy Metal Accumulations in Feral Pigeon (*Columba Livia*) as an Environmental Pollution Indicator, 2013.
- NIER, The comparative study on the anthropogenic and natural effects on the heavy metal contents of coniferous leaves, 2013.
- A. Alfani, G. Maisto, M. V. Prati, and D. Baldantoni, *Atmos. Environ.*, **35**, 3553-3559 (2001).
- N. Ratola, A. Alves, and E. Pillakis, *Water Air Soil Pollut.*, **215**, 189-203 (2011).
- T. Sawidis, J. Breuste, M. Mitrovic, P. Pavlovic, and K. Tsigaridas, *Environ. Pollut.*, **159**, 3560-3570 (2011).
- A. aghaei, H. Khademi, and S. Eslamian, *Helix*, **7**(5), 1873-1887 (2017).
- S. Norouzi, H. Khademi, A. F. Cano, and J. A. Acosta, *Ecolo. Indic.*, **57**, 64-73 (2015).
- M. M. Al-Alawi and K. L. Mandiwana, *J. hazard. mater.*, 148, 43-46 (2007).
- S. K. Prajapati and B. D. Tripathi, *Environ. Pollut.*, **151**, 543-548 (2008).
- N. Ratola, J. M. Amigo, and A. Alves, *Chemosphere*, **81**, 1517-1525 (2010).
- J. Klanova, P. Cupr, D. Barakova, Z. Seda, P. Anzel, and I. Holoubek, *Environ. Pollut.*, **157**, 3248-3254 (2009).
- S. A. S. Petkovsek, F. Batic, and C. R. Lasnik, *Environ. Pollut.*, **151**, 287-291 (2008).
- F. D. Nicola, V. Spagnuolo, D. Baldantoni, L. Sessa, A. Alfani, R. Bargagli, F. Monaci, S. Terracciano, and S. Giordano, *Chemosphere*, **92**, 1224-1230 (2013).
- H. Harmens, L. Foan, V. Simon, and G. Mills, *Environ. Pollut.*, **173**, 245-254 (2013).
- M. Chropenova, E. K. Greguskova, P. Karaskova, P.

- Pribylova, P. Kukucka, D. Barakova, and P. Cupr, *Ecol. Indic.*, **66**, 132-142 (2016).
28. M. Y. Chun, C. S. Lim, and T. W. Kim, *Korean J. of Environ. Agric.*, **18**(2), 135-139 (1999).
29. M. Ubat, E. Lehndorff, and L. Schwark, *Atmos. Environ.*, **38**, 3781-3792 (2004).
30. E. Lehndorff and L. Schwark, *Atmos. Environ.*, **44**, 2822-2829 (2010).
31. G. Bertolotti, E. C. Rada, M. Ragazzi, A. Chiste, and S. Gialanella, *Aerosol and Air Qual. Res.*, **14**, 677-685 (2014).
32. T. Piccardo, M. Pala, B. Bonaccorso, A. Stella, A. Redaelli, G. Paola, and F. Valerio, *Environ. Pollut.*, **133**, 293-301 (2005).
33. M. Y. Chun, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **13**(4), 237-244 (2010).
34. S. Norouzi and H. Khademi, *Eurasian J. of Soil Sci.*, **4**(3), 144-152 (2015).
35. E. Simon, M. Braun, A. Vidic, David Bogyo, I. Fabian, and B. Tothned, *Environ. Pollut.*, **159**, 1229-1233 (2011).
36. M. Tomasevic, Z. Vukmirovic, S. Rajsic, M. Tasic, and B. Stevanovic, *Chemosphere*, **61**, 753-760 (2005).
37. M. Tomasevic and M. Anicic, *Phys., Chem. Technol.*, **8**(1), 1-13 (2010).
38. R. J. Leonard, C. McArthur, and D. F. Hochuli, *Urban For. Urban Green.*, **20**, 249-253 (2016).
39. NIER, Annual Report of Atmosphere 2016, NIER-GP2017-078, 2017.
40. C. H. Jung, Y. S. Chun, and B. C. Choi, *J. KOSAE*, **19**(5), 515-528 (2003).
41. G. N. Bae, M. C. Kim, D. Y. Lim, K. C. Moon, and N. J. Baik, *J. KOSAE*, **19**(2), 167-177 (2003).
42. J. C. Ko and J. H. Yang, *J. Korean Soc. Environ. Technol.*, **19**(3), 263-273 (2018).
43. Y. K. Lee, K. J. Lee, J. S. Lee, and E. S. Shin, *J. KOSAE*, **28**(6), 666-674 (2012).
44. J. Stamenkovic and M. S. Gustin, *Enviro. Sci. Technol.*, **42**, 1367-1372 (2009).
45. P. H. Freer-Smith, K. P. Beckett, and G. Taylor, *Environ. Pollut.*, **133**, 157-167 (2005).
46. J. V. Räsänen, T. Holopainen, J. Joutsensaari, C. Ndam, P. Pasanen, Å. Rinnan, and M. Kivimäenpää, *Environ. Pollut.*, **183**, 64-70 (2013).
47. National Institute of Forest Science, Urban Forests Research Center, Announcement, 2017.
48. National Law Information Center, Enforcement rule of the Soil Environment Conservation Act, Appendix 3, The Criteria of Soil Pollution Concerns, 2017.
49. A. Parzych and J. Jonczak, *J. Ecol. Eng.*, **15**(3), 29-38 (2014).
50. M. Coskun, *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **76**, 320-326 (2006).
51. E. Simon, M. Braun, A. Vidic, D. Bogyo, I. Fabian, and B. Tothmeresz, *Environ. Pollut.*, **159**, 1229-1233 (2011).
52. M. Tomasevic, Z. Vukmirovic, S. Rajsic, M. Tasic, and B. Stevanovic, *Chemosphere*, **61**, 753-760 (2005).
53. M. Tomasevic and M. Anicic, *Physic. Chem. Technol.*, **8**(1), 1-13 (2010).
54. R. J. Leonard, C. mcArthur, and D. F. Hochuli, *Urban For. Urban Green.*, **20**, 249-253 (2016).
55. S. G. Yoo, T. W. Kim, and M. Y. Chun, *Korean J. Environ. Agric.*, **18**(2), 116-121 (1999).
56. Q. Liu, Y. Liu, D. Hu, and X. Wang, *Chem. Speciation Bioavailab.*, **23**(4) (2011).
57. T. A. Tomashuk, T. M. Truong, M. Mantha, and A. E. McGowin, *Atmos. Environ.*, **51**, 196-202
58. N. Ratola, S. Lacorte, D. Barcelo, and A. Alves, *Talanta*, **77**, 1120-1128 (2009).
59. M. Lee, Y. J. Lim, S. U. Lee, B. J. Kong, S. D. Lee, and J. S. Han, *J. KOSAE*, **23**(5), 515-525 (2007).
60. M. Y. Chun, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, **13**(4), 237-244 (2010).
61. H. M. Hwang, T. L. Wade, and J. L. Sericano, *Atmos. Environ.*, **37**, 2259-2267 (2003).

Authors' Positions

David Chung	: Senior Researcher
Jeong-Heui Choi	: Researcher
Jang-Ho Lee	: Senior Researcher
Soo-Yong Lee	: Researcher
Ha-Eun Lee	: Researcher
Ki-Wan Park	: Researcher
Kyu-Young Shim	: Researcher
Jong-Chun Lee	: Senior Researcher