

PAS를 위한 대기 중 PAHs의 소나무잎 침착율 산정

천만영[†]

환경대학교 환경공학과

Sampling Rate Evaluation of Atmospheric PAHs to Pine Needles for Passive Air Sampler

Man Young Chun[†]

Department of Environmental Engineering, Hankyung National University, Anseong 456-749, Korea

Received June 6, 2011/Accepted June 30, 2011

This study was carried out to use pine needles as passive air sampler (PAS) of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). PAHs concentrations in ambient air (C_a) and pine needles (C_p) were analyzed simultaneously from June 1 to December 31 using low volume PUF active air sampler. Furthermore, sampling rates ($m^3/day-g$ dry) of PAHs in the air to pine needles were calculated using C_a and C_p . Average sampling rate was 0.16 (0.00068-0.91) $m^3/day-g$ dry, which was the greatest in PAHs (Pyr, BkF, BaA, Chry, BbF, and BkF) with molecular weight of 202.26-252.32 and octanol-air partitioning coefficient ($\log K_{oa}$) of 8.61-11.37. These values were the lowest with respect to PUF disk, XAD-2 resin and semipermeable membrane devices (SPMDs) PAS, demonstrating that pine needles are suitable for long time PAS as a result of very low sampling rates.

Key words: Air, Pine needles, PAHs, Passive air sampler (PAS), Sampling rate

1. 서 론

다환방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)는 주로 화석연료를 포함한 유기물의 불완전 연소에 의하여 생성되는데 그 중 일부는 강한 발암성과 돌연변이성을 가지고 있어서 많은 연구와 관심의 대상이 되고 있다¹⁻³. PAHs는 대기를 통하여 장거리 이동되며 반휘발성 유기화합물(semivolatile organic compounds, SOC)이므로 강우 시나 기온이 낮아지면 대기로 부터 식물, 토양, 수계에 건식 및 습식 침착되고 또 기온이 높아지면 이들 환경매체로부터 대기 중으로 휘발되므로 대기 중 PAHs 농도를 아는 것은 PAHs의 환경 중에서의 순환을 이해하는데 매우 중요하다⁴.

대기 중 PAHs 농도를 측정하기 위해서는 전통적으

로 polyurethane foam(이하 PUF) sampler를 사용하여 시료를 채취하는데, PUF sampler는 고가일 뿐만 아니라 가동시 전원이 필요하므로 여러 장소에서 동시에 대기시료를 채취하거나 전원을 이용할 수 없는 지역에서는 사용이 어렵다. 이러한 문제점 때문에 많은 장소에서 동시에 시료를 채취하거나 전원이 공급되지 않는 외딴지역에서 대기시료를 채취할 경우 PAS (passive air sampler)는 아주 편리한 시료채취 도구이다⁵⁻²⁸.

지금까지 대기 중 PAHs의 PAS로는 나뭇잎, 나무껍질, 이끼 및 토양 등이 사용되어 왔다. 그러나 이들 PAS 중의 PAHs 농도를 이용하여 대기 중 PAHs 농도를 계산하는 것은 이들 PAS가 대기 중에 노출되어 있었던 시간과 노출되어 있었던 시간 동안 침착된 농도를 알 수가 없으며, 또 이들 PAS에 침착된 PAHs는 자

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-31-670-5172, Fax: 82-31-673-2704, E-mail: mychun@hknu.ac.kr

외선에 의하여 분해되고 또 풍속에 따라 침착되는 양이 달라지기 때문에 어려움이 많았다⁵⁻²⁴. 이러한 이유로 최근에는 보호용기(Shelter) 안에 PUF disk, XAD-2 resin 및 semipermeable membrane devices (SPMDs)를 넣어서 바람과 광분해로 생기는 영향을 줄이고 대기 중에 노출된 시간을 알 수 있는 PAS를 개발하여 대기 중 PAHs와 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs) 농도를 계산하는데 이용하고 있다²⁵⁻²⁸. 그러나 이러한 PAS 역시 PUF sampler 만큼 고가의 장비는 아니더라도 제작단가가 비교적 높고 시료채취 전에 흡착제를 세척하여야 하며 시료 채취를 위하여 sampler의 설치와 수거를 해야 하는 번거로움이 많다. 그러나 나뭇잎, 나무껍질, 이끼 및 토양 등을 PAS로 이용하는 biomonitoring 방법은 보호용기의 제작이나 흡착제의 세척 같은 예비단계가 없고, 언제 어디서나 시료의 채취가 가능하여 매우 편리하고 경제적이므로 상기에 기술한 문제점만 해결되면 아주 좋은 PAS가 될 수 있다.

소나무잎은 세계의 많은 지역에 자생하고 있어 시료의 채취가 용이하고 다른 수종보다 잎의 상피(cuticle)에 왁스(wax)가 많아 친유성인 PAHs의 침착이 쉽다. 또 소나무잎은 다년생이며 대기 중 PAHs가 잎에 누적 침착되므로 장기간의 대기 중 PAHs 농도변화에 대한 정보를 얻을 수 있고, 상록수로서 겨울에도 시료 채취가 가능하다^{5-9,16,18,20}. 특히 소나무잎은 남한 지역에서는 5월 말에서 6월 초에 새잎이 나오기 때문에 시료채취 시기만 알면 대기 중에 노출된 시간 산정이 가능하다¹¹. 최근 Chun은 대기 중 PAHs 농도(C_a)와 소나무잎 중 PAHs 농도(C_p)를 동시에 측정하고 $\log(C_p/C_a)$ 와 옥탄올-공기 분배계수(octanol-air partitioning coefficient, $\log K_{oa}$) 간의 상관성을 계산한 결과 큰 상관성을 보여 소나무잎 중 PAHs 농도(C_p)를 이용하여 대기 중 PAHs 농도(C_a)를 계산할 수 있다는 사실을 확인하였다¹². PAS 중 PAHs와 POPs 농도를 이용하여 대기 중 PAHs와 POPs 농도를 계산할 수 있는 또 다른 방법은 대기 중 각 POPs와 PAHs가 PAS에 침착되는 율(sampling rate)을 구하여 이 침착율로 대기 중 PAHs와 POPs 농도를 구하는 것으로 이미 많은 연구자들이 PUF disk, XAD-2 resin 및 SPMDs PAS로 침착율을 구하여 대기 중 PAHs와 POPs 농도 계산에 이용하고 있다²⁵⁻²⁸. 그러나 아직까지 소나무잎을 PAS로 사용하여 대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착되는 침착율을 구한 경우는 전혀 없다.

이 연구의 목적은 소나무잎을 대기 중 PAHs의 PAS로 사용하기 위하여 대기와 소나무잎 중 PAHs 농도를 장기간 동시에 측정하고 이 자료를 이용하여 대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착되는 침착율(sampling rate)을 구하는 것이다.

2. 연구방법

2.1. 시약

정제용 내부표준물질(internal surrogate standard; naphthalene- d_8 , acenaphthene- d_{10} , anthracene- d_{10} , chrysene- d_{12} , perylene- d_{12})과 첨가용 내부표준물질(recovery surrogate standard; 4,4'-dibromooctafluorobiphenyl)은 Supelco (Bellefonte, PA, USA)에서 구매하여 사용하였고 용매인 dichloromethane (DCM) 및 *n*-hexane은 HPLC grade (J.T.Baker, Philipsburg, NJ, USA)를 사용하였으며 *n*-hexane은 증류하여 사용하였다.

Na_2SO_4 (anhydrous granular, Shinyo Pure Chemical, Osaka, Japan), SiO_2 (70-230 mesh ASTM, Merck, Darmstadt, Germany)와 Al_2O_3 (70-230 mesh ASTM Merck, active basic, Darmstadt, Germany)는 130°C의 오븐에 24시간 이상 넣어 활성화시킨 후 사용하였다. GPC (gel permeation chromatography) 칼럼에 사용된 bio-bead는 Bio Rad사의 S-X3, 40-80 μm (Hercules, CA, USA)를 사용하였으며, 분석에 사용된 PAHs 검량선 작성용 표준용액(calibration standard)는 Supelco의 16가지 PAHs 혼합물(EPA 610 PAHs mix, Bellefonte, PA, USA)을 구매하여 사용하였다. Table 1에 PAHs의 종류, 약어 및 물리·화학적 특성을 기술하였다.

2.2. 시료채취

대기시료는 경기도 안성에 위치한 한경대학교 제 2 공학관(지상 4층 건물) 옥상에서 PUF (5×6.5 cm, Klaus Ziemer GmbH, Germany) 2개를 유리관에 직렬로 넣고 2대의 low volume PUF sampler를 사용하여 1시간 간격으로 on-off하면서 20-30 L/min 흡입유량으로 채취하였다. PUF의 최대 흡착용량을 고려하여 월별 총유량 600-700 m^3 씩 입자상과 가스상 PAHs를 동시에 채취하였다. 소나무잎(*Pinus koraiensis*)은 PUF 시료채취기 2-3 m 옆에 키가 약 1 m 정도인 3년생 소나무 두 그루를 화분에 심어 키웠다. 시료로 사

Table 1. Nomenclatures and physicochemical properties of 16 PAHs analysed in this study

| Nomenclature (IUPAC) | Abbreviation | Formula | Molecular weight | Vapor pressure ²⁹⁾ (Pa at 25°C) | log K_{oa} ³⁰⁾ (at 25°C) |
|------------------------|--------------|---------------------------------|------------------|--|---------------------------------------|
| Naphthalene | Naph | C ₁₀ H ₈ | 128.18 | 11.14 | 5.13 ²⁹⁾ |
| Acenaphthylene | AcPy | C ₁₂ H ₈ | 152.20 | 3.87 | 6.34 |
| Acenaphthene | Acp | C ₁₂ H ₁₀ | 154.20 | 3.07 | 6.52 |
| Fluorene | Flu | C ₁₃ H ₁₀ | 166.23 | 1.66 | 6.90 |
| Phenanthrene | Phen | C ₁₄ H ₁₀ | 178.24 | 1.06 × 10 ⁻¹ | 7.68 |
| Anthracene | Ant | C ₁₄ H ₁₀ | 178.24 | 8.6 × 10 ⁻⁴ | 7.71 |
| Fluoranthene | Flt | C ₁₆ H ₁₀ | 202.26 | 8.61 × 10 ⁻⁴ | 8.76 |
| Pyrene | Pyr | C ₁₆ H ₁₀ | 202.26 | 5 × 10 ⁻⁵ | 8.61 ²⁹⁾ |
| Benz[a]anthracene | BaA | C ₁₈ H ₁₂ | 228.30 | 5.43 × 10 ⁻⁴ | 10.28 |
| Chrysene | Chry | C ₁₈ H ₁₂ | 228.30 | 4.0 × 10 ⁻⁶ | 10.30 |
| Benzo[b]fluoranthene | BbF | C ₂₀ H ₁₂ | 252.32 | 5.0 × 10 ⁻⁷ | 11.34 |
| Benzo[k]fluoranthene | BkF | C ₂₀ H ₁₂ | 252.32 | 5.2 × 10 ⁻⁸ | 11.37 |
| Benzo[a]pyrene | BaP | C ₂₀ H ₁₂ | 252.32 | 6.0 × 10 ⁻⁸ | 11.56 |
| Dibenz[a,h]anthracene | DahA | C ₂₂ H ₁₄ | 278.36 | 1.33 × 10 ⁻⁸ | 12.59 |
| Indeno[1,2,3-cd]pyrene | Ind123 | C ₂₂ H ₁₂ | 276.34 | NR | 12.55 |
| Benzo[ghi]perylene | BghiP | C ₂₂ H ₁₂ | 276.34 | 1.38 × 10 ⁻⁸ | 12.43 |

NR indicates that data not reported.

K_{oa} : octanol-air partitioning coefficient.

용한 소나무잎은 5월 말에서 6월 초에 새순이 나왔으므로 소나무잎은 2010년 12월 31일에 채취하였다. 대기시료도 소나무잎이 대기에 노출된 기간과 동일한 기간 동안(2010년 6월 1일부터 2010년 12월 31일) 채취하였으며, PUF의 흡착용량을 감안하여 1개월 마다 PUF를 새것으로 교체하면서 대기시료를 채취하였다.

2.3. 추출 및 시료 건조

소나무잎은 두 그룹에서 각각 채취한 잎을 골고루 혼합한 후 한 그룹에서 5 g씩 취하고 합하여 10 g을 시료로 사용하였으며 2개의 시료(duplicate)를 만들어 속슬렛에서 DCM으로 24시간 추출하였다. 대기시료도 PUF 시료채취기를 이용하여 동시에 2개의 시료를 채취하였고 시료 채취 후 즉시 속슬렛에서 DCM으로 24시간 추출하여 분석시료로 사용하였다. 소나무잎의 건조시료 무게는 습시료 10 g을 95°C에서 24시간 이상 건조시킨 후 잔류 무게차로 구하였다.

2.4. 전처리

PAHs 전처리 방법은 기존의 문헌¹²⁾에서 충분히 설명하였으므로 간단하게 기술하면 속슬렛에서 추출한 PAHs 추출액을 회전증발 농축기에서 농축한 다음 1차로 silica-alumina 칼럼, 2차로 bio-beads를 충전시킨 GPC 칼럼으로 시료를 정제하였다. 정제한 시료를 회전증발 농축기에서 농축한 다음 첨가용 내부표준물질

를 첨가하여 GC-MS로 분석하였다.

2.5. QA/QC

PAHs의 정량 시 크로마토그램의 높이가 노이즈의 3배 이상인 것만 정량에 포함시켰으며, 정제용 내부표준물질(internal surrogate standard)로 사용된 5종의 중수소화(deuterated) PAHs를 이용하여 모든 전처리 과정에 대한 회수율을 평가한 결과 회수율은 42.5-105.1%(n = 6), 변이계수(coefficient of variation, CV)는 5.3-14.8%였으며, 분자량이 작을수록 회수율은 낮고 변이계수는 컸다. 시료마다 두 개의 부시료(duplicate)를 만들어 분석하였는데, 두 시료 간 평균변이계수는 대기시료는 15.5%(3.5-32.5%), 소나무잎은 11.2%(2.1-27.4%)였으며 naphthalene은 공시료(blank)의 피크가 너무 커서 계산에서 제외시켰다. 논문에 사용된 농도는 두 시료의 평균값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 소나무잎과 대기 중 PAHs 농도

Fig. 1은 6-12월까지 7개월 동안 대기 중 PAHs의 평균농도(C_w , ng/m³)와 동일한 기간 동안 대기 중에 노출된 소나무잎에 침착된 PAHs의 농도(C_p , ng/g dry)를 나타낸 것이다. 소나무잎과 대기 중 PAHs 농도는 대체로 저분자 PAHs (M.W. 228.30 이하; AcPy, Acp,

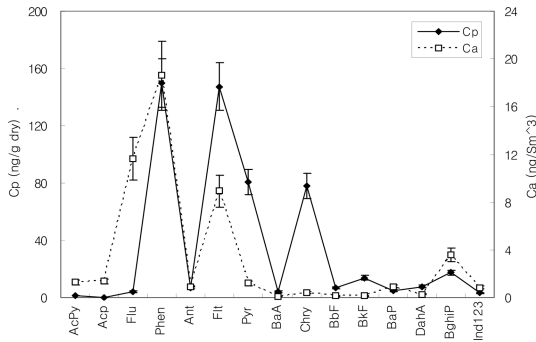


Fig. 1. PAHs concentrations in ambient air (C_a) and in pine needles (C_p).

Flu, Phen, Ant, Flt, Pyr, BaA와 Chry)의 농도가 높고 고분자 PAHs (M.W. 252.32 이상; BbF, BkF, BaP, DahA, BghiP와 Ind123) 농도는 낮은 분포를 보였는데, 특히 Phen, Flt, Chry와 BghiP에서 상대적으로 높은 농도를 보였다.

3.2. 대기 중 PAHs의 소나무잎으로의 침착특성

Fig. 2는 각 PAHs의 분자량(M.W), 옥탄올-공기 분배계수($\log K_{oa}$)와 (C_p/C_a)를 나타낸 것으로 PAHs의 분

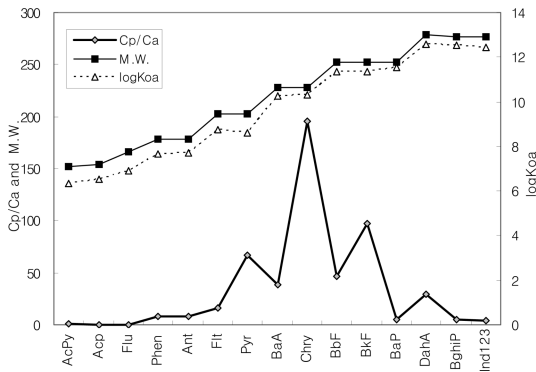


Fig. 2. Relationships among C_p/C_a , molecular weight (M.W) and octanol-air partitioning coefficient ($\log K_{oa}$) of PAHs.

자량과 $\log K_{oa}$ 는 비례하지만 대기 중 PAHs는 중간 정도의 분자량(202.26-252.32)과 $\log K_{oa}$ (8.61-11.37) 값을 가지는 PAHs (Pyr, BkF, BaA, Chry, BbF와 BkF)가 가장 많이 소나무잎에 침착되는 것으로 나타났다. Chun은 선행연구에서 C_p 와 C_a 간에는 상관성이 낮았고 $\log K_{oa}$ 와 $\log(C_p/C_a)$ 간에는 큰 상관성을 보였는데 저분자 PAHs에서는 정(+)의 상관성 [$\log(C_p/C_a) = 0.8277 \log K_{oa} - 5.7347$, $R^2 = 0.7797$ ($p = 0.0016$)]을 보였고 고분자 PAHs에서는 부(-)의 상관성 [$\log(C_p/C_a) = -1.6735 \log K_{oa} + 21.3917$, $R^2 = 0.8300$ ($p = 0.0043$)]을 보인다고 보고하였다¹²⁾. 이것은 대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착될 때에는 대기 중 PAHs의 농도(C_a)뿐만 아니라 PAHs의 K_{oa} 에도 크게 의존한다는 것을 의미한다¹³⁾.

Table 2는 $\log(C_p/C_a)$ 와 $\log K_{oa}$ 간 회귀직선을 비교한 것이다. Chun¹²⁾의 선행연구에서 나타난 바와 같이 저분자 PAHs에서는 정(+)의 상관성을 보였고 고분자 PAHs에서는 부(-)의 상관성을 보였다. Chun¹²⁾의 선행연구는 6월 초에서 8월 말까지 기온이 높은 하절기(시료채취 기간의 평균기온이 26.1°C)에 행해졌고 이 번 연구는 기온이 높은 6월 초에서 기온이 점점 낮아지는 12월 말까지 시료를 채취하였다(시료채취 기간의 평균기온이 17.3°C). 시료채취 기간의 평균기온이 낮아질수록 회귀직선의 기울기와 결정계수(coefficient of determination, R^2)가 작아져 상관성이 낮아지는 경향을 보였는데, 이러한 경향은 저분자 PAHs보다 고분자 PAHs에서 더 뚜렷하게 나타났다³³⁾. 이것은 PAHs는 SOCs로 기온이 높아지면 대기 중에서 가스상 분율이 높아지고 기온이 낮아지면 가스상 분율이 낮아지며, 대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착되는 주경로는 건식 가스상 침착이므로 기온이 높을수록 소나무잎에 침착되는 PAHs 양이 많아지기 때문으로 생각된다^{4,23)}. 그러나 기온이 낮은 겨울에 채취한 소나무잎 중 고분자 PAHs에서도 회귀직선의 결정계수($R^2 = 0.5408$)과 p-value (0.0596)은 통계적으로 유의하므로 소나무잎을 대기 중 PAHs의 PAS로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

Table 2. Regression lines between logarithm of PAHs concentration in pine needles to air [$\log(C_p/C_a)$] and octanol-air partitioning coefficient ($\log K_{oa}$)

| classification | regression line | remark |
|--|---|--|
| Lower molecular PAHs (below M.W. 228.30) | $\log(C_p/C_a) = 0.6251 \log K_{oa} - 5.0994$ $R^2 = 0.7885$ ($p = 0.0034$) | AcPy, Acp, Flu, Phen, Ant, Flt, Pyr, BaA, Chry |
| Higher molecular PAHs (over M.W. 252.32) | $\log(C_p/C_a) = -0.5884 \log K_{oa} + 7.3926$ $R^2 = 0.5408$ ($p = 0.0596$) | Chry, BbF, BkF, BaP, DahA, BghiP, Ind123 |

3.3. 대기 중 PAHs의 소나무잎으로의 침착율

Table 3은 대기 중 PAHs의 소나무잎으로의 침착율 (sampling rate, m³/day-g dry)를 나타낸 것으로 침착율은 중간 정도의 분자량(202.26-252.32)과 logK_{oa}(8.61-11.37) 값을 가지는 PAHs (Pyr, BkF, BaA, Chry, BbF와 BkF)에서 가장 큰 것으로 나타났다. 현재 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 PAS는 PUF disk PAS인데 PUF disk에 침착되는 PAHs의 침착율은 평균 3.21(2.28-4.50) m³/day of sampler로 높았지만 소나무잎의 침착율은 평균 0.16(0.00068-0.91) m³/day-g dry로 대단히 낮았다. 그러므로 PUF disk PAS의 경우 저분자 PAHs가 평형에 이르는데 소요되는 시간이 30일 정도로 짧지만 소나무잎은 3년 이상이므로 소나무잎은 장기간 대기 중 PAHs를 모니터링 할 수 있다는 장점이 있다^{8,12,27}). 침착율이 낮은 소나무잎의 특징 때문에 대기 중 PAHs 이 외에도 다이옥신과 퓨란 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin/furans, PCDD/Fs) 그리고 polychlorinated biphenyls (PCBs)도 3-4년 동안 누적침착이 일어난다는 것을 확인하였다^{7,20}). 일반적으로 PAS 중에 PUF disk, SPMDs(3.0-9.9 m³/day of sampler)와 XAD-2 resin(3.5±0.2 m³/day of sampler) PAS는 침착율이 높고 토양(0.023-0.17 m³/day-g)은 낮은 것으로 알려져 있는데, 소나무잎은 토양보다도 더 침착율이 낮았다²⁵⁻²⁸).

이상에서 살펴 본 바와 같이 Table 2에서 제시한 회귀식을 이용하여 소나무잎 중 PAHs 농도(C_p)와 logK_{oa}로부터 대기 중 PAHs 농도(C_a)를 계산할 수도 있고 Table 3에서 제시한 대기 중 각 PAHs의 소나무잎으로의 침착율(sampling rates)을 이용하여 소나무잎 중

Table 3. Sampling rates of PAHs in air to pine needles

| PAHs (Abbreviation) | Sampling rate (m ³ /day-g dry) | PAHs (Abbreviation) | Sampling rate (m ³ /day-g dry) |
|------------------------|---|------------------------|---|
| AcPy | 0.0045 | Chry | 0.914 |
| Acp | 0.00068 | BbF | 0.216 |
| Flu | 0.0016 | BkF | 0.456 |
| Phen | 0.038 | BaP | 0.025 |
| Ant | 0.038 | DahA | 0.137 |
| Flt | 0.077 | BghiP | 0.023 |
| Pyr | 0.314 | Ind123 | 0.018 |
| BaA | 0.178 | | |
| min | 0.00068 | | |
| max | 0.91 | | |
| mean | 0.16 | | |

PAHs 농도로 대기 중 PAHs의 농도를 계산할 수도 있다. 대기 중 각 PAHs의 소나무잎으로의 침착율은 (±)의 실험오차를 수반하지만 회귀직선을 이용하는 방법은 회귀직선이 (±)의 실험오차를 수렴하는 효과를 가지고 있기 때문에 더 정확한 대기 중 PAHs 농도를 계산할 수 있으리라 생각한다. 소나무잎에 침착된 PAHs는 자외선에 의하여 분해되고 대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착되는 농도는 풍속에 의하여 달라진다^{31,32}). 그런데 low volume PUF sampler를 사용하여 대기 중 PAHs 농도를 측정하고 같은 기간 동안 대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착되는 농도를 동시에 측정하면 PAHs의 자외선에 의한 분해와 풍속에 의한 오차문제가 모두 감안되므로 PAS를 보호용기 안에 넣지 않아도 문제가 없어진다.

4. 결 론

이 연구는 소나무잎을 대기 중 PAHs의 passive air sampler (PAS)로 사용하기 위하여 수행되었다. 6월 1일부터 12월 31일까지 7개월 동안 저용량 PUF air sampler를 사용하여 대기 중 PAHs의 농도(C_a, ng/m³)와 소나무잎에 침착된 PAHs 농도(C_p, ng/g dry)를 동시에 측정하고 대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착되는 침착율(sampling rates, m³/day-g dry)를 계산하였다.

대기 중 PAHs가 소나무잎에 침착되는 침착율(sampling rates)은 평균 0.16(0.00068-0.91) m³/day-g dry로 중간 정도의 분자량(202.26-252.32)과 logK_{oa}(8.61-11.37) 값을 가지는 PAHs (Pyr, BkF, BaA, Chry, BbF와 BkF)에서 가장 컸다. 이것은 PUF disk, XAD-2 resin과 SPMDs PAS보다 훨씬 낮은 값으로 소나무잎은 단기간보다는 장기간 대기 중 PAHs의 PAS에 적합하였다.

참고문헌

1. WHO, 1987, "Air quality guidelines for Europe" European SCr. No. 23, WHO Pub.
2. K. Ravindra, R. Sokhi and R.V. Grieken, *Atmospheric Environment*, 2008, 42(13), 2895-2921.
3. B.D. Eitzer and R.A. Hites, *Environmental Science & Technology*, 1989, 23(11), 1396-1401.
4. S.O. Baek and J.S. Choi, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 1998, 14(2), 117-131.
5. S.D. Choi and Y.S. Chang, *Journal of Korean Society for*

- Atmospheric Environment*, **2005**, 21(5), 481-494.
6. M.Y. Chun, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **1998**, 20(10), 1377-1383.
 7. M.Y. Chun, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **2005**, 27(6), 599-605.
 8. M.Y. Chun, *Journal of Environmental Toxicology*, **2008**, 23(3), 213-220.
 9. I.Y. Shim, H.G. Yeo, M.K. Choi, T.W. Kim and M.Y. Chun, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **2002**, 24(12), 2227-2237.
 10. T. Harner, M. Shoeib, M. Diamond, G. Stern and B. Rosenberg, *Environmental Science & Technology*, **2004**, 38(17), 4474-44834.
 11. J.R. Aboal, J.A. Fernandez and A. Carballeira, *Environmental Pollution*, **2001**, 115(2), 313-316.
 12. M.Y. Chun, *The Korean Society of Environmental Health and Toxicology*, **2011**, 26, eISSN 2233-6567.
 13. T. Gareth, A.J. Sweetman, W.A. Ockenden, D. Mackay and K.C. Jones, *Environmental Science & Technology*, **1998**, 32(7), 936-942.
 14. N. Hanari, Y. Horii, T. Okazawa, J. Falandysz, I. Bochentini and A. Orlikowska, *Journal of Environmental Monitoring*, **1999**, 6, 305-312.
 15. H. Kylin, A. Hellstrom, E. Nordstrand and A. Zaid, *Chemosphere*, **2003**, 51(8), 669-675.
 16. G. Ok, S.H. Ji, S.J. Kim, Y.K. Kim, J.H. Park, Y.S. Kim and Y.H. Han, *Chemosphere*, **2002**, 46, 1351-1357.
 17. S. Safe, K.W. Brown, K.C. Donnelly, C.S. Anderson, K.V. Markiewicz and M.S. McLachlan, *Environmental Science & Technology*, **1992**, 26(2), 394-396.
 18. W.M.J. Strachan, G. Eriksson, H. Kylin and S. Jensen, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **1994**, 13(3), 443-451.
 19. H.G. Yeo, M.K. Choi, M.Y. Chun, T.W. Kim and Y. Sunwoo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2002**, 18(4), 265-274.
 20. H.G. Yeo, K.C. Cho, M.K. Choi, T.W. Kim and M.Y. Chun, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **2006**, 28(8), 836-842.
 21. E. Bacci, D. Calamari, C. Gaggi and M. Vighi, *Environmental Science & Technology*, **1990**, 24(6).
 22. H. Hauk, G. Umlauf and M.S. McLachlan, *Environmental Science & Technology*, **1994**, 28(13): 2372-2379.
 23. K.W. Pausch, M.S. McLachlan and G. Umlauf, *Environmental Science & Technology*, **1995**, 29(4), 1090-1098.
 24. A.D. Guardo, S. Zaccara, B. Cerabolini, M. Acciarri, G. Terzaghi and D. Calamari, *Chemosphere*, **2003**, 52(5), 789-797.
 25. M. Shoeib and T. Haener, *Environmental Science & Technology*, **2002**, 36(19), 4142-4151.
 26. F. Wania, L. Shen, Y.D. Lei, C. Teixeira and D.C.G. Muir, *Environmental Science & Technology*, **2003**, 37(7), 1352-1359.
 27. J. He, R. Balasubramanian, *Atmospheric Environment*, **2010**, 44, 884-891.
 28. C. Chaemfa, J.L. Barber, T.Gocht, T. Harner, I. Holoubek, J. Klanova and K. Jones, *Environmental pollution*, **2008**, 153(3), 1290-1297.
 29. M. Mackay, W.Y. Shiu and K.C. Ma, **1997**, "Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals" volume II, pp250-251, Lewis Publishers, Michigan, U.S.A.
 30. O. Mustafa, E. Cetin and A. Sofuoglu, *Atmospheric Environment*, **2006**, 40, 615-6625.
 31. M.Y. Chun and T.W. Kim, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, **1998**, 17(2), 117-121.
 32. J.F. Niu, J.W. Chen, D. Martens, B. Henkelmann, X. Quan, F.L. Yang, H.K. Seidlitz and K.W. Schramm, *Science of the Total Environment*, **2004**, 322, 231-241.
 33. 기상청, *자동기상관측연보*, 2010, p191.