

나뭇잎에 침착된 PAHs 분석법 개발

김태욱 · 천만영[†]

환경대학교 환경공학과

Development of Analytical Method of PAHs Deposited on Tree Leaves

Taewook Kim and Man Young Chun[†]

Dept. of Environmental Engineering, Hankyung National University, Ansung 456-749, Korea

A simple, effective and economic method for clean-up samples to analyse PAHs deposited on pine needles was developed as follows. The juice was extracted from 4~5 g of pine needles cut into about 2 cm, twice with 50 mL of dichloromethane (DCM) in ultrasonicator for 1 hr, followed by collection and concentration using a rotary vacuum evaporator into 2~3 mL. The extract was passed through an 11 mm wide and 230 mm long glass column (packed from the bottom with 2.5 g of alumina, 1.5 g of silica and 2 g of sodium sulfate, and baked at 250 for 12 h) with a 70 mL of mixture of hexane: DCM (1:1). The eluate was concentrated into 1 mL by a rotary vacuum evaporator, and performed clean-up with an 80 mL of mixture hexane:DCM (1:1) using a 20 mm wide and 220 mm long GPC column packed with 12 g of Bio-beads. The first 37 mL of the eluate containing interferences was removed, and the latter 43 mL containing PAHs was collected and concentrated into 1~2 mL using a rotary vacuum evaporator, and transferred volumetric to a vial. Nonane was added as a keeper, followed by enrichment by nitrogen into 50 μ L on a hot plate for the GC-MS analysis. The estimation using the deuterated PAHs found the recoveries of the whole procedure as 42~105.1% (the coefficients of variation 5.3~14.8%). As decreasing the molecular weight, the recoveries decreased and the coefficients of variation increased.

Key words : polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), simple, clean-up method, silica-alumina column, GPC column, GC-MS

1. 서 론

α 환방향족 탄화수소 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)는 주로 화석연료의 불완전연소에 의하여 생성되는데 PAHs는 암, 돌연변이 및 최기형성 등을 일으키는 내분비계 장애물질 (endocrine disruptors)로 알려져 있다¹⁾. PAHs를 비롯한 잔류성 유기오염물질 (persistent organic pollutants, POPs)는 친유성 (lipophilic)이므로 대기에서 나뭇잎 표면에 도포되어 있는 지질(lipid)에 침착되는데, 이 특성을 이용하면 나뭇잎을 각 지역의 대기 중 POPs 농도를 측정하는 바이오 모니터로 활용할 수 있다. 특히 많은 지역의 대기

중 POPs 농도를 동시에 측정하여 비교하여야 할 경우나 전원을 사용할 수 없는 오지에서 대기 중 POPs 농도를 측정하여 비교하여야 할 경우에 나뭇잎은 바이오 모니터로서 매우 유용한 도구이다. 그리하여 많은 연구자들이 나뭇잎을 이용하여 각 지역의 대기 중 POPs 농도를 측정비교하고 있으며 여기에 대한 연구를 계속하고 있다²⁻¹⁸⁾. 그러나 나뭇잎 중 POPs를 분석하기 위하여 시료를 추출하면 나뭇잎 중 지질과 엽록소도 함께 추출되어 POPs 분석을 방해하므로 분석 전에 전처리를 통하여 이러한 방해물질들을 반드시 제거해 주어야 한다. 특히 POPs 중에서도 PAHs는 산 및 알칼리에 쉽게 분해되므로 polychlorinated biphenyls

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: cmy0122@naver.com

(PCBs), polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/dibenzofurans (PCDD/Fs) 등을 전처리 할 때처럼 산이나 알칼리를 이용하여 방해물질을 제거할 수 없는 어려움이 있다.

환경시료 중 PAHs를 분석할 경우 시료에 따라 전처리 방법이 상이하며, 같은 시료라 할지라도 연구자마다 각기 서로 다른 추출방법, 추출용매 및 전처리 방법을 사용할 정도로 다양한 전처리 방법이 사용되고 있다. 그러나 일반적으로 속슬렛으로 시료 중 PAHs를 추출하고 silica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) 및 florisil (magnesium silicate) 등을 충전한 chromatography column과 gel-permeation chromatography (GPC) column이나 carbon column을 조합하여 PAHs와 방해물질을 분리해 내는 방법이 사용되고 있다^{3,9,11-13,15-20,25}. 그러나 최근에는 accelerated solvent extraction (ASE)에 의한 시료추출과 SPMDs (semi permeable membrane devices)를 이용한 전처리법도 많이 이용되고 있는 추세이다²¹⁻²³. 그런데 silica, alumina 및 florisil은 미세입자로서 진폐증과 폐암을 일으키며 추출과 용출에 사용되고 있는 dichloromethane (DCM) 역시 발암물질로 분류되어 있다. 그러므로 가능하면 인체에 유해한 전처리용 물질의 사용량을 줄이는 것은 환경적으로 매우 중요하다. 아울러 전처리에 사용되고 있는 물질과 용매는 고순도 시약으로 전량 수입에 의존하고 있어 가격이 고가이기 때문에 오염방지와 경제적인 면에서 가능하면 적은 양의 시약과 용매를 사용하여 방해물질을 제거할 수 있는 전처리 방법의 개발이 필요하다. 그러나 아직 대부분의 연구자들은 나뭇잎 중 PAHs를 분석할 때 시료로 나뭇잎 수십 g을 사용하고 있는데, 시료양이 많을 경우 지질이나 엽록소 등 방해물질의 양도 많아 전처리 시 사용되는 시약과 용매양도 많아질 수 밖에 없다^{12,14,16-19}.

이 연구는 나뭇잎에 침착된 PAHs를 분석할 때 현재 사용되고 있는 전처리 방법보다 간편하고 효율적이며 경제적으로 방해물질인 엽록소와 지질을 제거하는 전처리법을 확립하는데 목적이 있다.

2. 실험 및 방법

2.1. 시료 채취

실험에 사용한 나뭇잎은 우리나라뿐만 아니라 다른 많은 나라에서도 자생하고 있어서 자료 호환이 쉽고 상록수로서 사계절 시료 채취가 가능하여 다른 수종에 비

하여 바이오 모니터로서 장점이 많은 소나무잎을 선택하였다¹⁵. 실험에 사용한 시료는 소나무에서 채취한 다음 용매로 세척한 알루미늄 호일에 싸서 PE 지퍼 백에 넣고 밀봉하여 아이스박스에 담아 실험실로 운반하였으며, 분석할 때까지 -20°C의 냉동고에 보관하였다. 분석 시에는 잎을 길이 약 2 cm로 잘라 골고루 섞은 다음 약 4~5 g을 시료로 사용하였다.

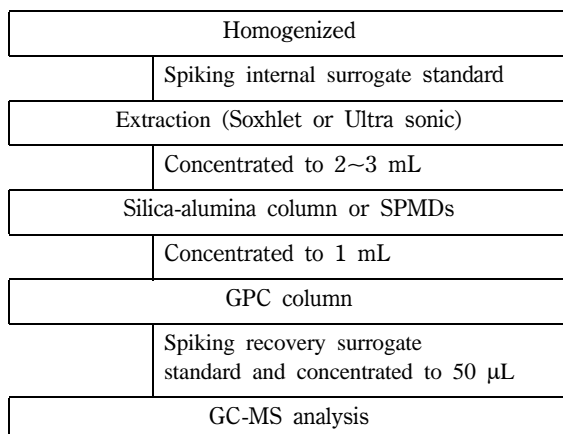
2.2. 시료 전처리 및 시약

정제용 내부표준물질 (internal surrogate standard)로는 naphthalene-d8, acenaphthene-d10, anthracene-d10, chrysene-d12, perylene-d12 (Supelco) 등 5종을, 실린지침가용 내부표준물질 (recovery surrogate standard)로는 4,4-dibromo-octafluoro-biphenyl (Supelco)를 사용하였다. 실험에 사용한 용매 [DCM, acetone 및 n-hexane]은 HPLC grade (J.T.Baker)를 사용하였으며 n-hexane은 증류하여 사용하였다.

시료 약 4~5 g에 정제용 내부표준물질을 spike하고 용매로 속슬렛과 초음파 추출기에서 시료를 추출한 다음 회전증발 농축기에서 추출용매를 약 3 mL까지 농축하였다. 농축액 속에는 엽록소, 지질 등 분석을 방해하는 여러 가지 오염물질들이 공존하고 있으므로 시료를 silica-alumina column과 SPMDs (Semi-Permeable Membrane Devices)를 이용하여 정제하였다. Silica-alumina column이나 SPMDs 만으로는 방해물질을 완전히 제거할 수 없으므로 GPC column을 사용하여 다시 정제하고 이 용출액을 회전증발 농축기에서 약 1~2 mL까지 농축하였다. 이 농축액을 10 mL vial에 정량적으로 옮긴 다음 keeper로서 n-nonane을 가한 후 hot plate에서 질소로 약 50 µL까지 서서히 농축시켜 GC-MS로 분석하였다. 시료 추출 및 전처리에 사용된 Na₂SO₄ (anhydrous granular, Shinyo pure chemical), SiO₂ (70~230 mesh ASTM, Merck)와 Al₂O₃ (Neutral grade 1, BDH)는 전기로에서 약 12 시간 baking한 후 활성을 유지하기 위하여 130°C의 오븐에 넣어 두고 사용하였다. GPC column에 사용된 Bio-beads는 Bio Rad사의 S-X3, 40~80 µm를 사용하였으며, 분석에 사용된 PAHs calibration standard는 Supelco의 16가지 PAHs 혼합물 (EPA 610 PAHs mix)을 구매하여 사용하였는데, standard에 포함된 PAHs의 종류는 Table 1에 나타내었고 Fig. 1에는 분석법의 전체 흐름도를 나타내었다.

Table 1. Nomenclatures and physico-chemical properties of 16 PAHs analysed in this study

Nomenclature (IUPAC)	Formular	Molecular weight	Ring No.
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	128.16	2
Acenaphthylene	C ₁₂ H ₈	152.20	"
Acenaphthene	C ₁₂ H ₁₀	154.21	"
Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	166.22	"
Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	178.22	3
Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	178.22	"
Fluoranthene	C ₁₆ H ₁₀	202.26	"
Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	202.26	4
Benzo(a)anthracene	C ₁₈ H ₁₂	228.29	"
Chrysene	C ₁₈ H ₁₂	228.29	"
Benzo(b)fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252.32	"
Benzo(k)fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252.32	"
Benzo(a)pyrene	C ₂₀ H ₁₂	252.32	5
Dibenz(a,h)anthracene	C ₂₂ H ₁₄	278.35	"
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	C ₂₂ H ₁₂	276.34	6
Benzo(g,h,i)perylene	C ₂₂ H ₁₂	276.34	"

**Fig. 1.** Analytical procedure for the determination of PAHs deposited on tree leaves.

3. 결과 및 고찰

3.1. 추출방법 비교

나뭇잎 중 PAHs의 추출을 위해서는 전통적으로 속슬렛 (soxhlet) 추출법이 이용되고 있으나 최근에는 초음파 추출법과 accelerated solvent extraction (ASE) 법도 많이 이용되고 있다^{15-17,23}. 그러나 ASE법은 고가의 장비가 필요하므로 이 번 연구에서는 속슬렛과 초음파 추출 (JAC 4020, 620W, 고도기연) 두 방법에 의한 추출율만 검토하였다. 나뭇잎 중 PAHs를 추출할 때 속슬렛의 경우 DCM 약 200 mL로 16시간 이상, 초음파 추출의 경우 DCM 50 mL로 1시간 추출한 다음 추

출액을 round bottom flask로 옮기고 다시 DCM 50 mL로 1시간 더 추출하였는데 이렇게 추출하면 거의 대부분의 PAHs가 추출되었으며 초음파 추출법이 속슬렛 추출법보다 약 2% 정도 추출율이 더 높았다. 속슬렛 추출법은 1조에 공시료 포함 6개의 시료만을 추출할 수 있지만, 초음파 추출법은 50 mL vial을 사용하므로 수십 개의 시료를 동시에 추출할 수 있고, 속슬렛에 비하여 추출시간이 짧으며, 추출율도 약간 높고, 추출액에 사용되는 용매양도 훨씬 적어서 장점이 많았다.

일반적으로 PAHs와 같은 극성 화합물을 추출할 때에는 DCM 같은 극성 용매를 사용하고, PCBs와 같이 비극성 화합물을 추출할 때는 n-hexane 같은 비극성 용매를 사용하여 추출한다²⁴. 그러나 소나무잎에는 수분이 상당량 포함 (40~45%)되어 있으며, acetone은 극성용매로서 수분과 대단히 혼합이 잘되므로 시료 중 POPs를 추출할 때에 acetone을 용매에 혼합하면 POPs 추출율을 높일 수 있다^{15,24,25}. 이 번 실험에서도 소나무잎 중 PAHs를 추출할 때 acetone이 PAHs의 추출율을 높일 수 있는지를 알아보기 위하여 DCM과 DCM:actone (4:1) 혼합용매를 사용하여 추출율을 비교한 결과, 두 용매 간 추출율에는 별 차이가 없었다.

3.2. 전처리 방법 비교

3.2.1. Silica-alumina column

Silica (SiO₂)와 alumina (Al₂O₃)를 고온에서 활성화시키면 지질 등 방해물질을 흡착하므로 silica와 alumina는 POPs 전처리에 많이 이용되고 있다^{4-6,8,15,24,25}. 소나무잎 중 PAHs 추출액을 회전증발 농축기 (수조 온도 40°C, 55 rpm)에서 약 2~3 mL까지 농축한 다음 내경 11 mm, 길이 230 mm인 glass column에 밑에서부터 Al₂O₃ 2.5 g, SiO₂ 1.5 g, 무수 Na₂SO₄ 약 2 g을 차례로 넣고 전기로에서 12시간 이상 baking한 후 hexane:DCM (1:1)으로 column을 세척하고 hexane:DCM (1:1)으로 용출하여 시료 중 엽록소와 지질을 제거하였다.

Silica-alumina column은 baking 온도에 따라 활성도가 달라지므로 최적 baking 온도를 알아보기 위하여 130°C, 250°C 및 400°C에서 약 12시간 baking한 후 PAHs 정제용 내부표준물질을 이용하여 회수율을 알아 보았는데 baking 온도가 높을수록 회수율이 낮아지는 경향을 보였다. Baking 온도 130°C에서의 평균회수율은 91% (81~97%)였고 250°C에서의 평균회수율은 88% (82~94%)로 회수율에 별 문제가 없었으나 400

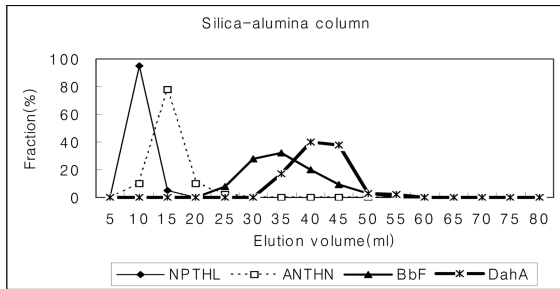


Fig. 2. Elution diagram of selected PAHs for the silica-alumina column.

°C에서는 평균회수율이 9.3% (8.8~10.5%)로 대단히 낮아 지나치게 고온에서 silica와 alumina를 baking할 경우 활성도가 너무 커 지질이나 엽록소 등 방해 물질 뿐만 아니라 분석대상물질인 PAHs도 흡착한다는 사실을 알 수 있었다. 그러므로 이 번 연구에서는 silica-alumina column을 250°C에서 12시간 이상 baking한 후 활성을 유지하기 위하여 130°C의 전기오븐에 넣어 놓고 사용하였다.

Fig. 2는 silica-alumina column을 250°C에서 약 12시간 baking한 다음 PAHs 표준용액을 이용하여 용출 특성을 실험한 것으로 분자량이 작을수록 용출속도가 빠르고 분자량이 클수록 용출속도가 느렸으며, hexane:DCM (1:1) 혼합용매 60 mL로 PAHs의 완전 용출이 가능하였으나 이 번 연구에서는 충분한 용출을 위하여 용출액을 70 mL로 하였다. 그러나 silica-alumina column만으로는 엽록소와 지질이 충분히 제거되지 않았다.

3.2.2. SPMDs

SPMDs (semi-permeable membrane devices)는 Huckins²¹⁾ 등이 처음 개발한 방법으로 저밀도 폴리에틸렌 (low-density polyethylene, LDPE) layflat tube에 시료를 넣고 용매로 투석 (dialysis)시켜 시료 중에 포함되어 있는 POPs를 지질 등 방해물질로부터 분리해 내는 방법이다. LDPE membrane은 약 10Å의 pore size를 가지고 있는데, 이 pore size는 분자 크기가 550 Da (Dalton) 이하인 POPs 분자는 통과시키고 600 Da 이상인 지질은 통과시키지 않는다. 또 LDPE membrane은 친유성이므로 친유성인 POPs는 통과시키지 않지만 물이나 친수성인 각종무기이온들과 황은 통과시키지 않는다. SPMDs는 특별하거나 비싼 장비를 필요로 하지 않고 수 십 개의 시료를 동시에 처리할 수

있으며 POPs를 파괴하지 않는 비파괴 전처리 방법이므로 산에 파괴되는 PAHs의 전처리에는 좋은 방법이다^{6,8-10,12,13,23,26-28)}.

이 번 실험에서는 두께 0.05 mm, 폭 36 mm, 길이 30 cm인 LDPE layflat tube (대길화학)를 사용하였는데, tube의 한 쪽 끝을 heating sealer로 봉인한 후 hexane으로 24시간 투석하여 불순물을 제거하였다. 초음파로 추출한 소나무잎 추출액을 1 mL까지 농축한 후 LDPE layflat tube에 정량적으로 옮겨 총 4 mL가 되게한 후 glass jar에서 n-hexane 400 mL를 교체해 가면서 24시간 씩 2회 투석하였다²³⁾. 이 투석 결과를 Fig. 3에 나타내었는데, silica-alumina column으로 전처리한 결과와 비교하여 보면 silica-alumina column으로 전처리한 시료의 총농도가 SPMDs로 전처리한 시료의 총 농도보다 약 4.6% 정도 더 높았고 추출에 필요한 용매양과 실험에 소요되는 시간에서도 silica-alumina column에 의한 방법이 더 유리하였다. Naphthalene은 대기 중 naphthalene의 고농도로 인하여 공시료의 농도가 시료의 농도와 거의 비슷하여 정량에서 제외시켰다.

3.2.3. GPC column

Silica-alumina column이나 SPMDs 만으로는 시료에 포함되어 있는 엽록소와 지질 등 방해물질이 충분히 제거되지 않았으므로 내경 20 mm, 길이 220 mm 유리관에 Bio-beads (S-X3, 40~80 µm, Bio Rad) 12 g을 충전시킨 GPC (gel permeation chromatography) column으로 다시 시료를 clean-up하였다. Hexane:DCM (1:1) 80 mL로 GPC column을 세척하고 silica-alumina column으로 용출한 용매를 회전증발 농축기에서 약 1 mL까지 농축한 다음 GPC column에 넣고 hexane:DCM (1:1) 혼합용매로 용출시켰다. Fig. 4는

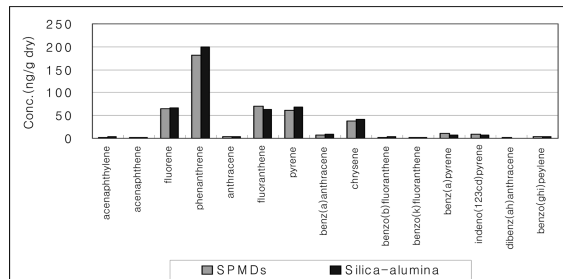


Fig. 3. Result of pine needles clean-up using SPMDs and silica-alumina column.

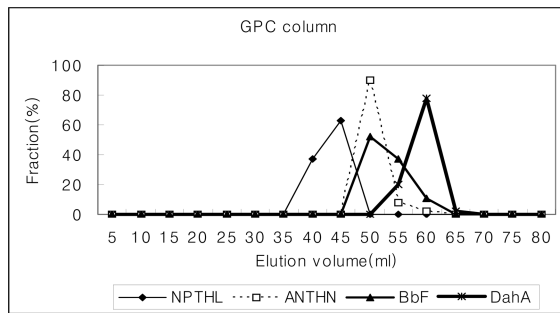


Fig. 4. Elution diagram of selected PAHs for the GPC column.

GPC column에 대한 PAHs의 용출특성을 나타낸 것으로 분자량이 적을수록 용출속도가 빨랐고 분자량이 클수록 용출속도가 느렸다. GPC column으로 용출한 용출액의 처음 37 mL에는 엽록소와 지질이 포함되어 있으므로 버리고 나중 43 mL는 PAHs fraction으로 분석에 이용하였다.

3.3. 분석

GPC column의 PAHs fraction을 회전증발 농축기에 서 약 1~2 mL까지 농축한 다음 10 mL vial에 정량적으로 옮기고 keeper로서 n-nonane 50 μ L를 가한 후 hot plate (40°C) 위에서 질소로 천천히 약 50 μ L까지 농축하여 GC-MS로 분석하였다. Table 2와 3은 PAHs 분석을 위한 GC-MS의 분석조건과 특성이온을 나타낸 것이며, Fig. 5(a)는 GC-MS로 분석한 PAHs calibration standard의 크로마토그램을, Fig. 5(b)는 실제 소나무잎의 크로마토그램을 나타낸 것이다.

Table 3. Characteristic ion of GC-MS for PAHs determination

Nomenclature(IUPAC)	Molecular weight	Characteristic ion
Naphthalene	C ₁₀ H ₈	128
Naphthalene-d8	C ₁₀ D ₈	136
Acenaphthylene	C ₁₂ H ₈	152
Acenaphthene	C ₁₂ H ₁₀	154
Fluorene	C ₁₃ H ₈	166
Acenaphthene-d10	C ₁₂ D ₁₀	164
Phenanthrene	C ₁₄ H ₈	178
Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	178
Fluoranthene	C ₁₆ H ₈	202
Anthracene-d10	C ₁₄ D ₁₀	188
Pyrene	C ₁₆ H ₈	202
Benz(a)anthracene	C ₁₈ H ₁₂	228
Chrysene	C ₁₈ H ₁₂	228
Benzo(b)fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252
Benzo(k)fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252
Chrysene-d12	C ₁₈ D ₁₂	240
Benzo(a)pyrene	C ₂₀ H ₁₂	252
Dibenz(a,h)anthracene	C ₂₂ H ₁₄	278
Benzo(g,h,i)perylene	C ₂₂ H ₁₂	276
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	C ₂₂ H ₁₂	276
Perylene-d10	C ₂₀ D ₁₂	264

3.4. 회수율

정제용 내부표준물질(internal surrogate standard)로 사용된 5종의 deuterated PAHs를 이용하여 모든 전처리 과정에 대한 회수율을 알아본 결과를 Table 4에 나타내었다. 분자량이 작아서 휘발성이 큰 PAHs의 회수율은 낮고 변이계수도 컸으며, 분자량이 커서 휘발성이 낮은 PAHs는 회수율이 높고 변이계수도 작은 경향을 보였다.

Table 2. Analytical conditions of GC-MS for PAHs determination

GC	HP 6890
Detector	HP Mass Selective Detector 5973
Electron energy	70 eV
Injector	Splitless
Sample injection volume	1 μ L
Carrier Gas	He 1 mL/min
Column	HP-5MS HP Crosslinked HP ME Sixoxane 30 m×0.25 mm×0.25 Film thickness
Temperature Programme	60°C for 1 min 20 °C/min to 130°C 4 °C/min to 300°C with a final hold of 15 min
Ionization mode	EI
Detection mode	SIM
Total Run Time	62 min
Injector Temperature	300°C

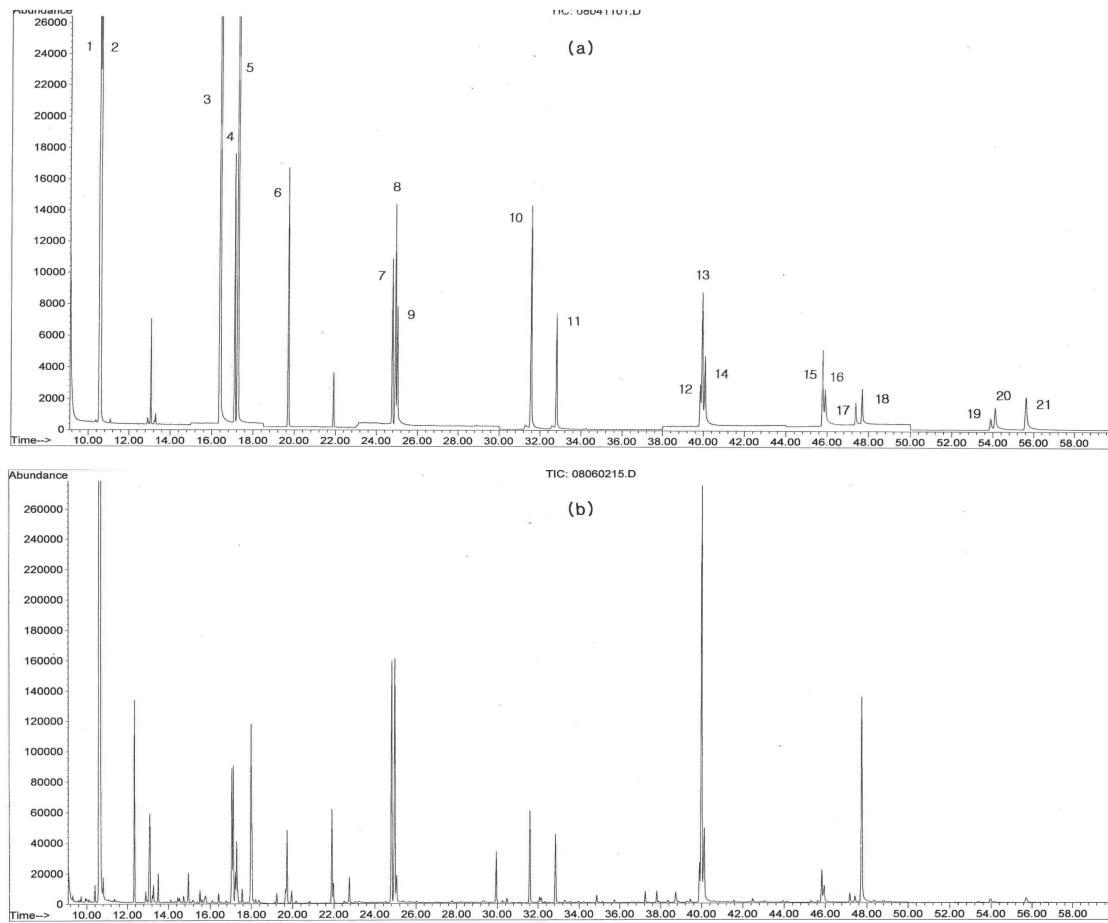


Fig. 5. GC-MS chromatogram of PAHs calibration standard (a) and pine needles (b). 1. Naphthalene-d8, 2. Naphthalene, 3. Acenaphthylene, 4. Acenaphthene, 5. Acenaphthene-d10, 6. Fluorene, 7. Phenanthrene, 8. Anthracene-10, 9. Anthracene, 10. Fluoranthene, 11. Pyrene, 12. Benzo(a)anthracene, 13. Chrysene-d12, 14. Chrysene, 15. Benzo(b)fluoranthene, 16. Benzo(k)fluoranthene, 17. Benzo(a)pyrene, 18. Perylene-d12, 19. Indeno(1,2,3-cd)pyrene, 20. Dibenz(a,h)anthracene, 21. Benzo(g,h,i)perylene.

Table 4. Recovery(%) of 5 deuterated PAHs for clean-up procedure

	1	2	3	4	5	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation(%)
Naphthalene-d8	34.7	48.1	47.2	45.8	36.7	42.5	6.3	14.8
Acenaphthene-d10	50.8	65.3	68.9	58.6	63.5	61.4	7.0	11.4
Anthracene-d10	80.9	79.8	76.5	70.5	92.8	80.1	8.2	10.2
Chrysene-d12	91.8	118.5	102.5	105.4	107.5	105.1	9.6	9.1
Perylene-d12	89.1	101.2	91.7	98.5	92.4	94.6	5.1	5.3

이상에서 살펴 본 바와 같이 소나무잎에 침착된 PAHs 추출 및 전처리 방법 중 가장 간편하고 효율적이며 경제적인 방법은 소나무잎 4~5 g을 초음파 추출기에서 추출한 후 silica-alumina column과 GPC column으로 정제하고, GC-MS로 분석하는 것이라 생각된다.

4. 결 론

소나무잎에 침착된 PAHs를 분석할 때 기존의 방법들보다 더 간편하고 효율적이며 경제적으로 전처리하는 방법을 아래와 같이 개발하였다.

1) 추출 : 약 2 cm 크기로 자른 소나무잎 4~5 g을

vial에 넣고 DCM 50 mL로 초음파 추출기에서 용매를 교체하면서 1시간씩 2회 추출하고 추출액을 회전증발 농축기에서 2~3 mL까지 농축한다.

2) Silica-alumina column : 농축액을 250°C에서 약 12시간 baking한 silica-alumina column (내경 11 mm, 길이 230 mm, 밑에서부터 Al₂O₃ 2.5 g, SiO₂ 1.5 g, 무수 Na₂SO₄ 2 g 충전)을 이용하여 hexane:DCM(1:1) 70 mL로 용출하고 회전증발 농축기로 1 mL까지 농축한다.

3) GPC column : 이 농축액을 GPC column (내경 20 mm, 길이 220 mm column에 Bio-beads 12 g을 충전)을 이용하여 hexane:DCM(1:1) 80 mL로 clean-up 한다. 용출액 중 처음 37 mL는 방해물질이 포함되어 있으므로 버리고 나머지 43 mL는 PAHs fraction이므로 분취하여 약 1~2 mL까지 회전증발 농축기에서 농축한다.

4) 농축액을 vial에 정량적으로 옮기고 keeper로서 n-nonane을 spike한 다음 hot plate에서 질소로 50 µL까지 농축하여 GC-MS로 분석한다.

5) 5종의 deuterated PAHs로 전과정의 회수율을 평가한 결과 42.5~105.1%(변이계수 5.3~14.8%)였으며 분자량이 작을수록 회수율은 낮고 변이계수는 컸다.

사 사

본 연구는 2007년도 환경대학교 교비 과제연구비의 지원에 의한 것임.

참고문헌

1. K.C. Chiang and C.M. Liao, *Science of the Total Environment*, **2006**, 372, 64-75.
2. G. Ericsson, S. Jensen, H. Kylin and W. Strachan, *Nature*, **1989**, 341(7), 42-44.
3. S.L. Simonich and R.A. Hites, *Environ. Sci. Technol.*, **1994**, 28(5), 939-943.
4. 천만영 *대한환경공학회지*, **1998**, 20(10), 1377-1383.
5. 여현구, 최민규, 천만영, 김태욱, 선우영, *한국대기환경학회지*, **2002**, 18(4), 265-274.
6. M.S. McLachlan, *Environ. Sci. Technol.*, **1998**, 32(3), 413-420.
7. M.S. McLachlan, *Environ. Sci. Technol.*, **1999**, 33(11), 1799-1804.
8. 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.
9. 옥근, 윤광옥, 김철수, 정봉길, 이석형, 황성민, 박노진, *한국환경분석학회지*, **2008**, 11(1), 22-28.
10. D. Xu, L. Deng, Z. Chai and X. Mao, *Chemosphere*, **2004**, 57, 1343-1353.
11. M. Lodovici, V. Akpan, C. Casalini, C. Zappa and P. Dolara, *Chemosphere*, **1998**, 36(8), 1703-1712.
12. D. Nakajima, Y. Yoshida, J. Suzuki and S. Suzuki, *Chemosphere*, **1995**, 30(3), 409-418.
13. S.L. Simonich and R.A. Hites, *Environ. Sci. Technol.*, **1994**, 28(5), 939-943.
14. P. Tremolada, V. Burnett, D. Calamari and K.C. Jones, *Environ. Sci. Technol.*, **1996**, 30(12), 3570-3577.
15. 천만영, *대한환경공학회지*, **2001**, 23(6), 921-930.
16. M. Howsam, K.C. Jones and P. Ineson, *Environmental Pollution*, **2000**, 108, 413-424.
17. H. Kaupp and M. Sklorz, *Chemosphere*, **1996**, 32(5), 849-854.
18. S.Y.N. Yang, D.W. Connell, D.W. Hawker and S.I. Kayal, *The Science of the Total Environment*, **1991**, 102, 229-240.
19. J. Franzaring, R. Bierl and B. Ruthsatz, *Chemosphere*, **1992**, 25(6), 827-834.
20. D.M. Wagrowski and R.A. Hites, *Environ. Sci. Technol.*, **1997**, 31(1), 279-282.
21. J. N. Huckins, M. W. Tubergen, J. A. Lebo, R. W. Gale and T. R. Schwartz, *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, **1990**, 73, 290-293.
22. J. Meadows, D. Tillitt, J. Huckins and D. Schroeder, *Chemosphere*, **1993**, 26(11), 1993-2006.
23. 천만영, *환경독성학회지*, **2007**, 22(1), 49-55.
24. K.C. Jones, *Environmental Science Department, Lancaster University*, **1995**.
25. M.G. Ikononou, T.L. Fraser, N.F. Crewe, M.B. Fischer, I.H. Rogers, P.J. Sather and R.F. Lamb, *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 2389, **2001**.
26. J. Meadows, D. Tillitt, J. Huckins and D. Schroeder, *Chemosphere*, **1993**, 26(11), 1993-2006.
27. A.L. Rantalainen, N.F. Crewe and M.G. Ikononou, *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, **1999**; 75(1-2), 1-17.
28. K.D. Wenzel, B. Vrana, A. Hubert and G. Schuurmann, *Anal. Chem.*, **2004**; 76: 5503-5509.