

PC3) 제주도의 지역적 특성에 따른 토양 중 PAHs의 분포특성

김영배*, 강경호, 이민규¹, 감상규

제주대학교 토목환경공학전공, ¹부경대학교 응용화학공학부

1. 서 론

PAHs(다환방향족탄화수소류(polycyclic aromatic hydrocarbons)는 탄소와 수소로 이루어진 2개 이상의 고리를 가진 방향족 화합물로 변이원성과 발암성을 일으키는 물질로 구성성분에 따라 200여 물질이 있으며 이는 화산분출이나 산불 등의 자연적인 오염원과 인간의 활동에 기인한 화석연료의 불완전 연소에 의한 인위적인 오염원에 의해서 생성되며, 주로 인위적인 오염원에 의해서 생성되는 것으로 알려져 있다. 특히 인위적인 PAHs는 산업 활동, 가정난방, 발전소, 소각로 등에서의 유기물질의 불완전 연소, 기름 유출 및 자동차 배출물 등이 있다(Wilcke, 2000). 이와 같이 생성된 PAHs의 토양으로의 주요 유입 경로는 대기로부터의 확산 오염원에 의한 침적으로 알려져 있으며(Bakker 등, 2001), 이런 과정을 통해 유입된 PAHs는 토양오염뿐만 아니라 수질 오염 및 환경오염을 유발시키는 것으로 보고 되고 있다(Keiichi 등, 1992).

본 연구에서는 제주도 토양 환경에서의 PAHs에 관한 기초연구의 일환으로, 제주도의 지역별 특성을 고려하여 이동·고정 배출원의 영향이 예상되는 6개의 지역으로 나누어 이들 지역의 토양을 대상으로 분포 특성을 살펴보고, 이의 분포에 영향을 미칠 것으로 예상되는 토양 환경특성인 유기물과 입도분포와 총 PAHs 농도 분포와의 상관성을 검토하였고, 또한 특정 PAHs 상대 비 및 상관 분석을 통해 오염 기원을 추정하였다.

2. 재료 및 방법

시료의 채취는 제주도의 지역별 특성을 고려하여 이동·고정 배출원의 영향이 예상되는 주거지역(residential area, R), 교통지역(traffic area, T), 발전소지역(power plant area, P), 소각장지역(incineration area, I), 항구지역(harbor area, H), 공장지역(factory area, F)으로 구분하여 총 47지점에서 시료를 채취하였다(Table 1). PAHs을 정성·정량 분석하는 과정은 크게 용매 추출, 유도체화, 정제, 분석의 4단계를 걸쳐 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 제주도의 지역별 특성에 따른 토양 중 PAHs의 분포

주거지역의 t-PAHs 및 t-PAH_{CARC} 농도범위는 각각 23.18-130.95 ng/g dw, 6.31-60.18ng/g dw이었으며, 이를 지점별로 살펴보면, RS-1지점이 타 지점에 비해 높게 나타났다.

이는 이 지점이 주거·상가가 복합적으로 이루어진데다 이동 차량이 비교적 많은 지역으로 인한 영향이 큰 것으로 사료된다. 그리고 RJ-1 및 RJ-2 와 RS-2 지점의 농도가 비교적 낮게 나타났는데, 이것은 이 지점들이 대체로 주거 지역이었고, 반대로 농도가 높게 나타난 지점인 경우 주거와 상가들이 밀집한 지역이기에 이에 따른 영향 차이로 나타난 결과로 사료된다.

Table 1. The location and number of sampling sites in soil in JeJu-Island

Area	Location	Number
Residential Area(R)	Jeju-si(RJ)	RJ-1,RJ-2
	Seogwipo-si(RS)	RS-1,RS-2
	Namjeju-gun(RN)	RN-1,RN-2
	Bukjeju-gun(RB)	RB-1,RB-2
Traffic Area(T)	Jeju-si(TJ)	TJ-1,TJ-2
	Seogwipo-si(TS)	TS-1,TS-2
	Namjeju-gun(TN)	TN-1,TN-2
	Bukjeju-gun(TB)	TB-1,TB-2
Power plant Area(P)	Jeju-si(PJ)	PJ-1,PJ-2
	Namjeju-gun(PN)	PN-1,PN-2
	Bukjeju-gun(PB)	PB-1,PB-2,PB-3,PB-4
Incineration Area(I)	Jeju-si(IJ)	IJ-1,IJ-2,IJ-3,IJ-4
	Seogwipo-si(IS)	IS-1,IS-2,IS-3,IS-4
Harbor Area (H)	Jeju-si(HJ)	HJ-1
	Seogwipo-si(HS)	HS-1
	Namjeju-gun(HN)	HN-1,HN-2
	Bukjeju-gun(HB)	HB-1
Factory Area (F)	Jeju-si(FJ)	FJ-1,FJ-2,FJ-3,FJ-4, FJ-5
	Seogwipo-si(FS)	FS-1, FS-2, FS-3
	Bukjeju-gun(FB)	FB-1, FB-2

교통지역에서 t-PAHs 및 t-PAH_{CARC} 농도범위는 각각 24.79-219.74 ng/g dw, 12.33-79.72 ng/g dw 이었으며, 이는 국내의 부산시와 서울시의 Traffic area에서의 결과보다 아주 낮은 농도 수준을 보였다. 이런 결과의 차이는 본 연구의 조사 지역이 위의 조사 지역과 달리 도시화 및 이동 통행량 등의 영향에 따른 것으로 사료된다. 각 지점들에 대해 살펴 보면, 본 연구에서는 비교적 이동 차량이 많은 지역인 TJ-2 지점에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 대체적으로 중심가에 있는 TJ, TS 지점들이 농도가 높고, 중심가에서 벗어난 TB와 TN의 지점들이 농도가 낮게 나타났으며, 이는 토양에서의 PAHs의 농도가 도시 중심가에서 거리가 멀어질수록 감소된다는 것으로 판단된다.

항구지역은 t-PAHs 및 t-PAH_{CARC} 농도 수준이 8.15-87.96 g/g dw, 10.26-43.24 ng/g dw 으로 본 연구 조사 지역 중에서 가장 낮은 농도 수준을 보였으며, 항구지역에서 가장 높은

농도는 HS-1지점, 가장 낮은 농도가 HB-1지점이다. HS-1 지점인 경우 관광객이 드나드는 주변에서 시료를 채취함으로써, 선박에 의한 영향뿐만 아니라 관광객에 따른 활동과 자동차와 같은 이동 발생원에 의한 영향 정도가 큰 것으로 사료된다. 그리고 가장 낮은 농도를 나타낸 HB-1지점인 경우 명확하지 않지만, 시료 채취당시 부두 정리 사업으로 인한 공사의 진행에 따른 영향 및 새로운 흙으로 복토 등에 의한 영향 등으로 추정된다.

소각장지역에서 t-PAHs 및 t-PAH_{CARC} 농도범위는 각각 22.27-260.48 ng/g dw, 5.80-117.92ng/g dw으로 본 연구에서의 다른 지역들에 비해 농도 수준이 높았으며, 지점별에서는 IJ-4 지점이 높은 농도 수준인 260.48 ng/g dw이고, 최저 농도는 IS-2지점으로 23.27 ng/g dw으로 나타났다. 그리고 대체적으로 IJ 지점들보다 IS 지점의 농도 수준이 낮는데, 이는 소각장의 운전가동기간, 처리 양 및 제주도의 지리적 특성인 강한 바람에 따른 대기의 확산의 영향 등에 의한 것으로 사료된다.

공장지역의 t-PAHs 및 t-PAH_{CARC} 농도는 각각 12.06-157.35 ng/g dw, 3.73-53.53 ng/g dw로 분포하고 있었으며, 같은 지역을 대상으로 국내외서 수행한 타 연구결과보다는 매우 낮았는데, 이는 비교 대상 공장지역에 비해 본 연구 Factory area이 비교적 공단 규모 및 활성화에 따른 차이로 인한 것으로 사료된다. 공장지역을 지점별로 살펴보면 FJ-5지점이 가장 높은 농도를 FB-2지점이 가장 낮은 농도를 보였다. 그리고 공장지역은 대체적으로 오염원과 거리상으로 가까운 지점들인 FJ-5, FB-1, FS-1의 농도가 높음을 볼 수 있다.

발전소지역인 경우 t-PAHs 농도 범위가 23.87-219.74 ng/g dw, t-PAH_{CARC} 농도 범위는 10.12-42.50 ng/g dw를 나타내었다. 이 지역의 지점들을 살펴보면, PJ-2지점의 농도가 가장 높게 나타났는데 이는 지리적 특성인 해풍으로 인한 오염물질의 확산 등의 영향으로 사료된다. 그리고 최근 건설된 소각장에 비해 화력발전소의 PAHs의 농도가 비교적 낮게 나타났는데, 이는 PAHs 오염물질의 확산과 더불어 받 토양과 목축지의 차이로 인한 영향 등에 따른 차이로 사료된다.

3.2. PAHs의 오염기원

본 조사 지역의 토양에서의 PAHs의 오염기원을 규명하기 위해서 여러 문헌에서 이용하고 있는 오염 기원 지수를 이용하여 검토하였다.

지역별에 따른 2-3개의 고리를 가진 저분자량 PAHs와 4-6개의 고리를 가진 고분자량 PAHs의 비를 살펴보면, 모든 지역에서는 저분자 화합물보다는 고분자의 화합물이 상대적으로 풍부함을 나타내고 있어 조사 지점에 대한 PAHs 오염의 기원은 유류 오염의 가능성보다는 연소 기원의 가능성이 큰 것으로 사료된다.

Yang 등(1991)이 제시한 PAHs에서 phenanthrene/anthracene(PH/AN)과 fluoranthene/pyrene(FLR/PY)비에 의한 PAHs 오염의 기원(PH/AN 비가 약 4이면 자동차 배기가스에 의한 기원, 50이상일 때는 유류 오염의 기원으로 보았다. 그리고 FLR/PY 비가 1 이하이면 연소기원, 1이상일 경우에는 비 연소 기원 또는 기름 유출로 인한 기원으로 분류)을 살펴 보면, 대체적으로 값들의 변화가 다양하게 나타났으나 본 연구 지역의 토양에서 PAHs의 오염은 연소기원이 우세한 것으로 판단된다.

3.3 PAHs 농도분포와 토양 특성과의 상관성

토양에서 PAHs 화합물의 분포에 미치는 유기물의 영향을 평가하기 위하여 본 연구에서 사용된 전체 토양에서의 유기물 함량 및 지역별 유기물 함량과 t-PAHs 농도와의 상관성을 검토한 결과, 전체토양에서의 유기물 함량과 t-PAHs의 상관성(r^2)은 0.1623으로 아무런 상관성이 없으며, 지역별에 따른 상관성(r^2)은 소각장지역 0.46, 주거지역 0.42, 교통지역 0.30, 발전소지역 0.21, 항구지역 0.16, 공장지역 0.05로 토양 중의 유기물 함량과 t-PAHs 농도와 상관성이 낮음을 보였다. 본 연구에서 t-PAHs 농도와 유기물의 상관성이 낮은 이유는 토양 중 유기물의 PAHs 흡착용량에 미치지 못하는 소량의 PAHs가 유입되는 영향의 결과로 추정된다.

토양 입도 분포에 따른 t-PAHs 농도와 상관성을 Fig. 15에 나타내었다. 사토(Sand), 미사(Silt)와 식토(Clay)와의 상관성 계수(r^2) < 0.014로 본 연구지역의 토양 입도와 t-PAHs 농도와의 상관성을 보이지 않음을 알 수 있었다.

4. 결 론

제주도의 지역별 특성을 고려하여 이동·고정 배출원의 영향이 예상되는 6개의 지역(주거지역, 교통지역, 발전소지역, 소각장지역, 공장지역, 항구지역)의 47지점에서 토양을 채취하여 이들의 PAHs의 농도 분포 특성, t-PAHs와 토양 특성과의 상관성 및 오염 기원을 규명하였다. 검출된 t-PAHs 농도 및 t-PAH_{CARC}의 농도분포를 지역별로 비교하면 소각장지역 > 교통지역 > 공장지역 > 발전소지역 > 주거지역 > 항구지역 순으로 높은 농도로 분포하고 있었다. 토양에서 PAHs에 대해 저분자와 고분자의 비(LMW/HMW), PH/AN비, FLR/PY비, B(a)P/BPE 비로 판단하는 오염기원의 연구 결과, 조사된 토양에서 검출된 PAHs 화합물은 연소기원에 의한 영향이 우세한 것으로 나타났다. 토양에서 PAHs의 분포에 미치는 영향 여부를 살펴보기 위해 유기물함량 및 입도 분포와 t-PAHs와의 상관성을 검토한 결과 상관성이 없거나 매우 낮은 값을 보였는데, 이는 PAHs 부하 및 다양한 토양 특성 등에 기인한다고 판단된다.

참 고 문 헌

- Keiichi. A., S. takashi, Y. Mashiro and K. Yasushi, 1962, Polynuclear aromatic hydrocarbon concentration and mutagenic activity in soils sampled at roadsides, J. Japan Soc. Air Pollut., 27(4), 190-197.
- Wilcke W., S. Müller, N. Kanchanakool, C. Niamskul and W. Zech, 1999, Polycyclic aromatic hydrocarbons in hydromorphic soils of the tropical metropolis Bangkok, Geoderma., 91, 297-309.
- Yang, S. Y. N., D. W. Connell, D. W. Hawarker and S. I. Kayal, 1991, Polycyclic aromatic hydrocarbons in air, soil, and vegetation in the vicinity of an urban roadway. Sci. Total Environ., 102, 229-240.