

선오염원으로부터 이격거리에 따른 토양의 물리화학적 인자가 토양중 PAHs에 미치는 영향

지반환경팀

김익수 · 김은숙 · 최낙경 · 김세정 · 조기찬 · 김교봉 · 엄석원

Effect of the Physical-Chemical Factors of PAHs Distribution in the Roadside Soil According to the Distance from Line Contamination Source

Geoenvironment team

**Ick-soo Kim, Eun-sook Kim, Nak-kyoung Choi, Se-jeong Kim,
Ki-chan Jo, Gyo-bung Kim and Seog-won Eom**

Abstract

Analytical results for soil samples collected from six nearby highways, including the Olympic highway were obtained to examine polycyclic aromatic hydrocarbons:PAHs contained in soils near highways as line contamination source of the major Seoul area were as follows.

1. The hydrogen ion concentration of the soil samples and traffic volume near highways showed remarkable significance at a level of 0.01 indicating differences existed among groups, but the percentage of water content and amount of organic matter showed no significance in conformity with different highways.
2. Fluorene was detected in the highest amount at 2.145 ug/kg at the Namsan beltway. The amounts of phenanthrene were in order of Namsan beltway (NS)>Bugak skyway(BS)>Dongbu main way(DB)>Olympic highway(OP) at 46.945, 34.252, 27.307, and 18.223 ug/kg, respectively. Naphthalene and acenaphthylene, fluorene possessing 2~3 rings showed a detection rate of 1.1%, noacenaphthene was detected with 43.4, 41.0, 39.6, 35.8% detected for pyrene>fluoranthene>chrysene>benzo(a)pyrene.
3. For the Olympic great way, which had the greatest traffic volume, naphthalene, pyrene, benzo(a)anthracene, benzo(e)fluoranthene, indeno(1,2,3-c,d)pyrene and benzo(ghi)perylene were detected at 3.17, 1.154, 1.396, 2.884, 1.384 and 3.916 times higher than at the Dongbu main way.

4. The pH increased the greater the distance from the roadside. The correlation coefficients between pH and organic matter, pyrene and benzo(ghi)perylene of the PAHs decreased by -0.406, -0.622 and -0.683, but no correlation was detected between organic matter, pyrene and benzo(ghi)perylene. The correlation between the soil formation depth and pH was positive, and organic matter, water content, pyrene and benzo(ghi)perylene were strongly negative ; -0.714, -0.645, -0.660 and -0.702, respectively.
5. The PAH components, except naphthalene, acenaphthylene and acenaphthene, were very significant and also showed a grouping trend.
6. The highest total detection rate of 16 PAHs was 19.9% at 4-6 m from the roadside and then 16.0% at 6-8 m.
7. PAHs were detected 40.3% with 10~12.5% of organic matter, which was up to 2 times higher than that of <5%, 5~7.5% and 7.5~10% in roadside soil.

Key words : PAHs, concentration, detection rate, roadside soil. Seoul way

서론

다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons:PAHs)는 2개 이상의 벤젠링이 결합된 유기화합물 그룹으로 유기물이 불완전 연소하면서 발생하는 화학물질이다. 수백여가지 이상의 형태로 존재하는 PAHs는 단일물질이 아닌 검댕과 같은 연소생성물의 한 부분의 복합체로 생성되며, 다양한 발생원이 환경중에 널리 분포하면서 인간의 건강에 나쁜 영향을 미치기 때문에 중요한 미세유기성오염물질이다(1, 2). PAHs는 주로 열분해 공정의 결과로서 생성되는 데, 특히 석탄과 석유 공정, 천연가스의 연소, 가열, 재용해 연소, 교통, 요리와 담배피우는 것, 탄화과정(carbonization)과 같은 자연적인 process 등 산업이나 인간의 활동 동안에 유기물의 불완전연소 결과물로 생성되는데 수백종의 PAHs 중 benzo(a)pyrene이 발암물질로 가장 잘 알려져 있다. 게다가 nitro- PAHs 뿐만 아니라 carbazole 이나 acridine 과 같은 수많은 heterocyclic aromatic 화합물도 불완전연소에 의하여 생성된다. 이들의 변이성과 발암성(3) 때문에 US EPA와 European Community에서는 주요 오염물로 분류하여 오염된 토양을 광범위하게 조사하고 있다(4). 토양과 지하수에 유입된 PAHs나 유류성분과 같은 독성물질들은 다양한

경로를 통하여 직접 혹은 간접적으로 사람에게 피해를 준다. 대부분의 독성 유기물질들은 물에 잘 녹지 않는 소수성 때문에 토양에 흡착되거나 nonaqueous phase liquid(NAPL)로 남아 장기간에 걸쳐서 주변 지하수를 오염시키는 오염원으로 작용한다. 다환방향족 탄화수소는 물에 대한 용해도가 상대적으로 낮으나 매우 친유성이 강한 물질이며, 대기중에서 낮은 증기압을 가진 대부분의 PAHs는 입자(particles)에 흡착되고, 물속에 용해되었을 때는 입자와 결합하고 태양복사로부터 오는 자외선에 노출되면 광분해가 일어난다. 대기중에서 PAHs는 오존, 질소화합물, 이산화황과 반응하여 각각 dione-, nitro-, dinotro -PAHs와 sulfonic acid를 생성한다(5).

한편 carcinogenic PAHs가 거의 모든 표토에서 나타나며, 숲속토양에서 보통 5 µg~100 µg/kg의 범위로 나타나는데, PAHs의 상당한 양이 대기로부터 식물이나 침엽수 잎과 같은 유기물질에 흡착되기 때문에 식물잔해로부터 토양에 전달되기 때문이다. 농업지역 토양은 주로 대기강하물로부터 기원된 10~100 µg/kg 수준의 발암성 PAHs를 포함하는데 산림과 농촌토양에서, 때때로 1,000 µg/kg 정도로 높게 검출되기도 한다. 도시지역은 화석연료 연소, 산업공정 등 많은 오염원 때문에 산림이나 농촌지역보다 더 높은 PAH농도를 나타낸

다. 대부분의 도시지역 토양은 600~3000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 범위를 보이며, 교통량이 많고 산업화된 지역 가까이에서는 더 높은 수치를 예측할 수 있으며 1,000~3,000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 정도로 나타났고, 도로변 먼지에서 8,000~336,000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 의 농도가 보고된 적이 있다(6). 최근 국내에서도 대기 중의 PAHs에 대한 연구가 활발하게 진행되면서 토양중의 PAHs에 대한 분포특성, 분석기법, 처리기술에 대한 연구가 잇따르고 있다. 서울 부산 울산 온산 제주등 5개지역 8개지점에서 benzo(a)pyrene등 16개 성분을 분석한 총 PAHs(t-PAHs)는 50.8~1,942.53 ng/g로 나타났으며 모든 검사지점에서 2~3개의 링을 가진 저분자량 PAHs가 4개 이상의 분자량을 가진 PAHs 농도보다 낮게 나타났다고 보고된 바 있다고 보고되었다(7). 또한 지속적으로 PAHs에 대한 연구가 활발하게 진행되어 전국 226개 지점을 조사하여 한국의 토양에 존재하는 PAH의 농도는 23.3~2824 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 평균값은 236 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 밝힌 바 있으며(8), 유기점토에 의한 PAHs의 흡착경향성이 점토에 첨가되는 계면활성제의 크기와 첨가량에 따라 달라질 수 있다고 보고되었다(9). 또한 PAHs의 주요염원으로 고려되는 자동차에 의한 연소가 이루어지는 도로주변의 농도가 높은 것으로 나타났으며(10), 지역별 특성을 고려하여 교통, 공장, 상업, 주거, 산림지역 등으로 농도 분포를 조사하기도 하였다(11). 이와 같이 대기중의 PAHs는 가스상 또는 입자상으로 존재하며, 부유분진 등에 흡착되어 이동하거나 대기오염물질의 침적과정을 통해 토양, 수계, 식생 등으로 제거되거나 토양중의 연구는 그리 많지 않은 편이다.

본 연구는 교통량의 증가에 따라 자동차의 연소로부터 생성된 가스가 대기로부터 토양으로 침적되어 토양중 잔류성 유기오염물질(persistent organic compounds: POPs)로 존재하면서 생태계나 인간에게 지속적으로 영향을 미치고 있는나 이에 대한 기초조사가 미미한 실정으로 수행하게 되었다. 이에 따라 서울시내 주요 간선도로변 토양중 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons: PAHs)에 대한 토양의 물리화학적 특성에 따라 토양중 분포특성을 규명하여 토양환경 관리의 기초자료로 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 시료채취

토양 시료는 서울시내 주요 간선도로중 그림 1에 나타난 바와 같이 이동배출원의 영향이 지속적으로 예상되는 24시간 차량통행이 지속되는 올림픽대로, 동부간선도로와 이보다 차량통행이 적은 동일로, 남부순환로, 남산순환로, 차량통행이 거의 없어 이동배출원의 영향이 거의 없을 것으로 예상되는 사직공원~북악스카이웨이 등에서 115개 시료를 봄과 가을에 채취하였다. 시료채취 위치에서 지점별로 중앙지점과 주변 4개 지점에서 깊이 0~3 cm 이내로 채취하여 혼합하여 1개 시료로 하였다. 남부순환로에서 채취한 시료는 표토층 0~3 cm 과 심토 5~20 cm로 구분하여 채취하였다. 시기별로 5월과 10월에 동일한 지점에서 채취하여 계절별로 변화를 보고자 하였으며, 각 조사지역에서 채취한 시료는 즉시 갈색 광구병에 담아 실험실로 옮겼다.

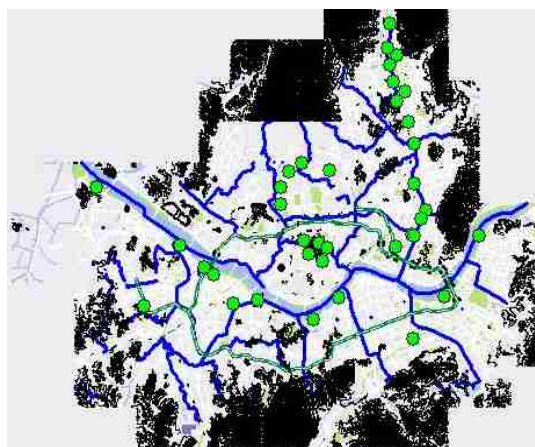


Fig. 1. Sampling sites for PAHs survey.

2. 분석방법

각 지점별로 채취된 시료는 실온에서 충분히 건조한 후, 자갈, 뿌리 등의 조대물질을 제거하고 나서 막자사발로 분쇄하여 No.40(425 μm) 체로 균질화하였다. 시료중 PAHs의 성분을 분석하기 위하여 토양시료 20 g을 고속용매추출기(ASE 200 Accelerated Solvent Extractor: Dionex)를 이용

(12)하여 1:1(v:v)아세톤-디클로로메탄 용액으로 추출한 후 추출 시료를 질소농축기(TurboVap[®] II:Zmark)를 이용하여 10 mL로 농축하였다. 이 중 1 mL를 분취하여 n-Hexane로 활성화한 SPE cartridge를 이용하여 dichloromethane로 추출 정제한후 질소농축기를 이용하여 정확히 2 mL로 농축한 다음 바이알에 담아 GC에 주입하였다.

3. 기기분석

분석대상물질은 US EPA에서 우선관리대상물질로 선정한 16종 PAHs을 GC/MS(Thermo Finnigan Trace GC와 Thermo Finnigan Polaris Q)를 사용하였고, 분석조건은 그림 2와 같다.

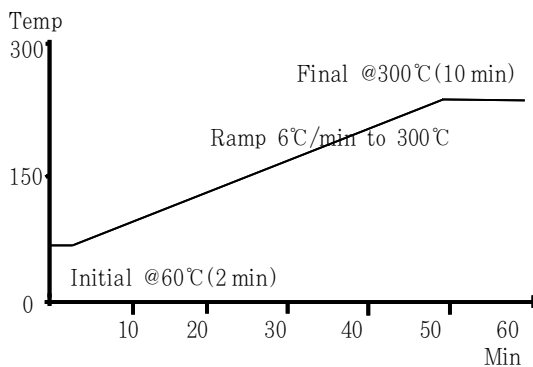


Fig. 2. Temperature programming of GC for PAHs analysis.

분석 컬럼은 DB-5MS(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm film)을 사용하였고, carrier gas He 1.0 mL min, injection port 온도 300°C, injection mode splitless, injection volume 2 μL, MS는 interface temp 280°C, scanning range : 30~300 amu, 2 cycle/sec, ionization Voltage 70eV, scan mode를 사용하였다.

4. 수소이온농도, 함수율 및 유기물 측정

수소이온농도(pH)는 토양 10 g을 비이커에 넣고 증류수 50 mL를 첨가하여 유리막대로 저어주면서 1시간 방치후 측정하였다. 함수율은 증발접시를 미리 105~110°C에서 건조시킨 후 데시케이터 안에서 방냉하고 항량하여 무게를 정확히 잰

다음 시료를 넣어 증발접시와 시료의 무게를 재고 105~110°C 건조기 안에서 4시간 건조후 데시케이터안에서 방냉하고 항량으로 하여 무게를 측정하였다. 유기물의 측정은 함수율을 측정한 토양시료를 항량한 다음 10 g을 자기도가니에 넣어 무게를 측정하고 전기회화로(Muffle furnace MF-1200)에서 800°C 4시간 가열한 후 다시 무게를 측정하여 그 감량을 측정하였다.

5. 분석대상물질의 구조식과 분자식

대표적인 PAHs를 표 1에 물질명, 약어, 구조식, 화학식과 분자량을 나타냈으며 이중 U.S EPA에서 지정한 priority pollutant 16개 성분을 분석대상 PAH로 선정하였고 순도 97.3% 이상이 되는 분말형태의 표준물질을 구입하여 dichloromethane에 녹여 사용하였다.

결과 및 고찰

도로변 토양은 자동차로부터 나오는 배기가스의 영향을 받으며, 이들 가스중에는 유기물의 불완전 연소시 발생하는 PAHs 가 포함(16)되어 있다. 이에 도로변 토양에 축적된 PAHs의 분포특성과 선오염원인 도로로부터의 거리에 따른 영향을 알아본 결과는 다음과 같다.

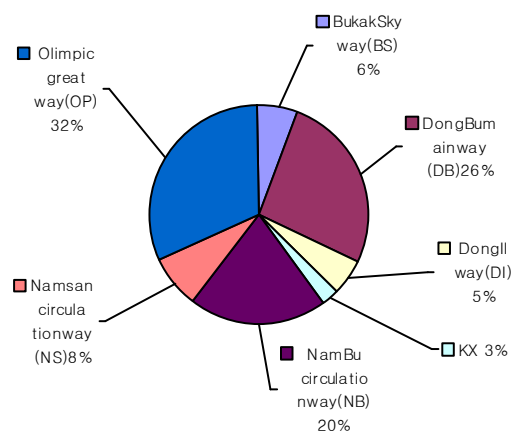


Fig. 3. The sample distribution graph of PAHs survey in Seoul.

토양시료는 총 115개의 시료로 그림 3에 나타낸 바와 같이 올림픽대로변(OP)과 동부간선도로변

(DB)에서 32%, 26%를 채취하였으며, 남부순환도로변(NB)는 1개 지점에서 거리와 깊이를 증가

Table 1. Nomenclatures, Abbreviation and structural formula of 21 PAHs

No.	Nomenclatures(IUPAC)	Abbreviation	Structure	Formular(M.W)
1.	Naphthalene	NPTHL		C ₁₀ H ₁₂ (128)
2.	Acenaphthylene	ACNPL		C ₁₂ H ₈ (152)
3.	Acenaphthene	ACNPN		C ₁₂ H ₁₀ (154)
4.	Fluorene	FLURN		C ₁₂ H ₁₂ (154)
5.	Phenanthrene	PHEN		C ₁₄ H ₁₀ (178)
6.	Anthracene	ANTER		C ₁₆ H ₁₀ (178)
7.	Fluoranthene	FLRTH		C ₁₆ H ₁₂ (202)
8.	Pyrene	PYR		C ₁₈ H ₁₂ (202)
9.	Benzo(c)phenanthrene	BcPH		C ₁₉ H ₂₂ (228)
10.	Cyclopenta(c,d)pyrene	CcdP		C ₂₀ H ₂₂ (226)
11.	Benzo(z)anthracene	BaA		C ₁₈ H ₁₂ (228)
12.	Chrysene	CHRY		C ₂₂ H ₁₂ (228)
13.	Benzo(e)pyrene	BeP		C ₂₂ H ₁₂ (252)
14.	Benzo(b)fluoranthene	BbF		C ₂₂ H ₁₂ (252)
15.	Benzo(k)fluoranthene	BkF		C ₂₀ H ₂₂ (252)
16.	Benzo(a)pyrene	BaP		C ₂₀ H ₂₂ (252)
17.	Dibenz(a,h)antbracene	DabA		C ₂₂ H ₁₄ (278)
18.	Benzo(ghi)peryleae	BghiP		C ₂₂ H ₁₂ (276)
19.	Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	I123P		C ₂₂ H ₁₂ (276)
20.	Anthanthrene	ANTHN		C ₂₂ H ₁₂ (276)
21.	Coronene	COR		C ₂₄ H ₁₂ (300)

note) Fate and behavior of PAHs in the Ambient air. 1994.

Table 2. The values of physical factors soil sampling as the road sites

Road	Stat. item	pH	Water content(%)	Ignition loss(%)	Vehicles(No.)
BS	Mean	6.184	9.327	8.680	28.714
	Std. deviation	0.587	5.682	3.265	17.632
DB	Mean	7.381	9.517	7.071	591.033
	Std. deviation	0.761	7.287	4.098	109.578
DI	Mean	6.322	3.957	5.020	250.326
	Std. deviation	0.914	4.371	1.175	145.102
NB	Mean	8.189	10.681	7.079	359.217
	Std. deviation	0.716	5.108	1.432	2.066
NS	Mean	6.381	9.907	8.647	141.444
	Std. deviation	1.503	7.889	3.603	82.117
OP	Mean	7.342	9.916	6.644	901.270
	Std. dev.	0.767	6.726	2.107	218.577
Total	Mean	7.273	9.510	7.050	573.717
	Std. deviation	1.042	6.535	2.897	322.519

Table 3. The variance analysis of the groups between physical factor and road

Union	Factor	Pearson's χ^2 (sig. probability)	Square sum	Freedom degree	Mean square	F value	Significance probability
	pH	606.402(0.184)	43.061	6	7.177	9.740	1.62E-08
	Water content	671.179(0.312)	247.209	6	41.201	0.963	0.454
	Organic matter	656.200(0.281)	72.413	6	12.069	1.474	0.194
	Vehicles	424.000(0.000)	8,797,932	4	2,199,483	104.587	5.1E-35

시키면서 채취한 것이다. 표 2는 도로에 따라 채취한 토양의 pH, 함수율, 강열감량을 나타낸 것으로, 도로별 pH, 함수율, 강열감량의 각각 6.381~8.189, 3.957~10.681%, 5.020~8.680% 를 나타냈으며 동일로 토양은 함수율과 강열감량에서 가장 낮게 나타났다. 또한 자동차 통행량은 올림픽대로가 901.270대/10 min로 북악스카이웨이의 28.174대/10 min와 비교하여 30배 정도 많았다.

표 3에 나타난 바와 같이 도로변 토양에 따라 수소이온농도와 통행량은 유의수준 0.01에서 매우 유의하게 나타나 집단간에 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나 함수율이나 유기물량은 도로에 따라 유의성을 나타내지 않았다. 또한 도로별 토양이 pH,

함수율, 유기물, 통행량에 따라 다르다고 할 수 있는지 알아보기 위한 동일성검정을 하기위하여 카이제곱통계량(Pearson's χ^2 statistic)(13)을 비교하였는데 통행량에 따라 도로변의 토양이 영향을 받을 수 있으며, 함수율이나 수소이온농도, 유기물에 따라서는 다르지 않은 것으로 나타났다.

GC/MS 분석을 통한 16종의 PAHs의 도로변 토양의 검출율은 표 4에 나타난 바와 같이 휘발성 고체의 증약으로 사용되는 2개의 링을 가진 naphthalene(15)과 3개의 링을 가진 acenaphthylene, fluorene는 1.1%의 검출율을 보였고 acenaphthene은 검출되지 않았으며, pyrene) fluoranthene)chrysene)benzo(a)pyrene 순으로

각각 43.3, 41.0, 39.6, 35.8%로 나타났다. 이는 구조상으로 벤젠고리의 연결시 가지치기에 의하여 형성된 만 지역(bay region)을 형성하기 시작하는 phenanthrene부터 토양과의 접촉성이 늘어나는 것으로 추측된다. 최대값, 평균값, 합계 PAHs는 은 분자량이 늘어날수록 높아지는 경향을 보이거나 indeno

(1,2,3-cd)pyrene, dibenzo([a,h] anthracene는 농도가 낮게 나타났다. 이는 터널내에서 자동차에 의한 PAHs 의 배출 성분은 주로 저분자량인 naphthalene > phenanthrene > fluorene > acenaphthylene로 조사된 것(16)과 많은 대조를 보이고 있다.

Table 4. The PAHs statistics of the 115 samples in the roadside soil

Compounds	Detection rate(%)	Max.	Mean(mg/kg)	Std. dev.	Total
Naphthalene	0.9	0.270	0.007	0.035	0.757
Acenaphthylene	0.1	0.017	0.000	0.002	0.017
Fluorene	0.1	0.019	0.000	0.002	0.019
Phenanthrene	30.6	0.229	0.020	0.042	2.345
Anthracene	32.1	0.289	0.032	0.055	3.657
Fluoranthene	41.0	0.297	0.031	0.057	3.550
Pyrene	43.3	0.307	0.039	0.067	4.522
Benzo(a)anthracene	24.6	0.415	0.021	0.055	2.397
Chrysene	39.6	0.115	0.016	0.021	1.869
Benzo(b)fluoranthene	17.9	0.349	0.019	0.057	2.181
Benzo(k)fluoranthene	35.8	0.382	0.034	0.064	3.903
Benzo(a)pyrene	35.8	0.465	0.046	0.086	5.331
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	6.0	0.337	0.010	0.044	1.101
Dibenzo([a,h]anthracene	3.7	0.034	0.001	0.004	0.059
Benzo(ghia)perylene	28.4	1.004	0.067	0.156	7.668

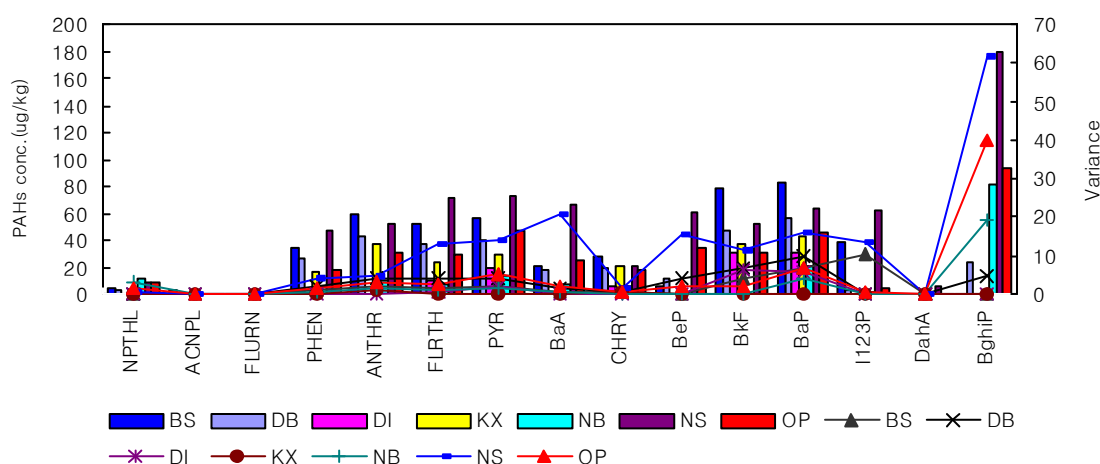


Fig 4. The concentration comparison and variance of PAHs according to the roadside soil.

그림 4에서 도로별 토양의 PAHs의 naphthalene 평균농도는 남부순환로(NB)에서 11.730 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 가장 높게 나타났으며 올림픽대로, 북악스카이웨이길(BS), 동부간선도로(DB) 순으로 나타났다. Acenaphthylene는 BS 에서만 2.447 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 로 나타났다 나머지 도로에서는 ppb 수준이하로 검출되었다. Fluorene는 남산순환로(NS)에서 2.145 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 가장 높게 검출되었으며, phenanthrene는 NS>BS>DB>OP 순으로 46.945, 34.252, 27.307, 18.223 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 나타났다. 또한 anthracene은 BS>NS>OP 순으로 나타났고, fluoranthene은 BS>NS>DB 순이었고 pyrene은 anthracene와 마찬가지로 BS>NS>OP 순으로 나타났고, benzo(a)anthracene는 fluoranthene와 같은 순서로 나타났다. Benzo(e)fluoranthene은 NS>OP>DB 순으로 각각 61.206, 33.591, 11.647 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 나타나 앞에서 언급한 NS>BS 나 BS>NS와는 다른 순서를 보였다. Benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene, indeno(1,2,3-c,d)pyrene은 NS나 BS에서 높은 농도를 보였다. Dibenzo(a,h)anthracene는 NS에서만 6.537 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 의 농도를 보이고 다른 도로변에서는 ppb 수준이하로 검출되었고 benzo(ghi)perylene는 NS에서만 179.056 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 특이하게 높게 검출되었다. 각 도로별로 농도차이는 있으나 터널에서는 naphthalene, phenanthrene, fluoranthene, pyrene가 지배적인 성분을 보이거나(16) 토양중에서는 벤젠링이 3개이하에서는 나프탈렌이 주성분을 이루고 다른 성분은 benzo(e)fluoranthene, dibenzo(a,h)anthracene를 제외하고는 골고루 나타났다. 이는 토양중의 PAHs는 자동차의 영향을 받을 뿐만 아니라 다른 오염원에 의한 영향 또는 토양에 흡착된 PAHs가 토양과의 화학적 미생물적 반응에 의하여 변하고 있음(17)을 시사한다.

이와 같이 도로별 토양에 따른 평균농도 분포는 NS, BS와 같은 산림에 가깝고 고도가 높은 지역에서 높은 농도를 보이는 특성을 나타내 교통량에 의한 직접적인 영향이 없음을 나타내는 것으로 사료된다.

지형상 수변도로이며 차량통행량도 50 vehicles/분 이상으로 비슷한 조건인 동부간선도로(DB)와 올림픽대로(OP)의 비교한 결과는 그림 5와 같다.

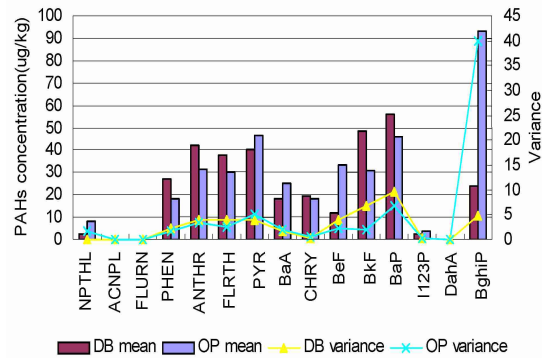


Fig 5. The concentration comparison of the PAHs as the 2 roadside soil.

차량통행량이 더 많은 올림픽대로에서 naphthalene, pyrene, benzo(a)anthracene, benzo(e)fluoranthene, indeno(1,2,3-c,d)pyrene과 benzo(ghi)perylene가 동부간선도로보다 각각 3.17, 1.154, 1.396, 2.884, 1.384, 3.916배 높은 농도를 보였다. 이에 비하여 동부간선도로에서는 phenanthrene, anthracene, fluoranthene, chrysene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene이 각각 1.499, 1.437, 1.255, 1.059, 1.556, 1.225배 높은 농도를 보였다. 이와 같은 농도차이는 chrysene과 benzo(e)fluoranthene을 제외하고는 PAHs 성분의 분산이 높으면 성분의 농도도 높아지는 것으로 나타났다.

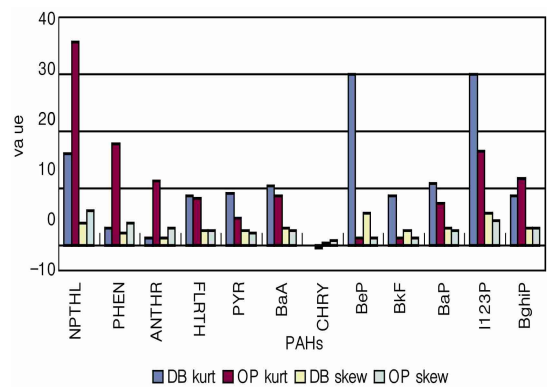


Fig. 6. The comparison of the distribution differences in OP and DB soil.

그림 6에 나타난 바와 같이 올림픽대로와 동부

간선도로의 성분별분포상 침도와 왜도는 모두 양의 값을 보여 평균보다 작은 값이 많은 분포를 보이지만 토양의 특성상 특정 PAHs 성분과 결합을 잘 이루는 지점에서 높은 농도를 보이는 것으로 판단되며, 침도 또한 0 이상의 값을 보여 정규분포보다 평균값을 중심으로 모여있는 형태를 분포 범위가 좁게 나타났다. 이로써 PAHs는 토양의 지점별 특성에 따라 분포를 달리하며 집단성을 이루는 특성이 있는 것으로 판단된다.

도로변으로부터 이격거리에 따른 PAHs 분포를 집중적으로 알아보기 위하여 도로에서 0.3, 1, 3, 7, 10, 15, 20, 25, 30 m 지점을 선정하여 표토시료를 채취하고 깊이별로 5, 10, 15, 20 cm 토양을 채취하여 분석한 결과, 표 6과 같이 수소이온농도, 함수율, 유기물은 평균값이 각각 8.189, 10.681%,

7.079%로 나타났고, 남부순환로상에서 한 지점을 선택하여 도로변으로부터 거리와 깊이에 따라 토양특성 인자인 pH, 함수율, 유기물, 시료채취시간 등이 PAHs 농도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 상관분석한 결과는 그림 7과 같이 나타났다. 도로변으로부터 거리가 멀어질 수록 pH가 증가하고, 유기물과 PAHs 성분중 pyrene와 enzo(ghi)perylene는 상관계수가 각각 -0.406, -0.622, -0.683를 보이며 감소하는 것으로 나타났으며 이외의 PAHs는 상관성이 나타나지 않았다. 또한 토양층위가 깊어질수록 pH가 양의 상관성을 나타냈으며, 유기물과 함수율이 각각 -0.714, -0.645, PAHs 성분중 pyrene와 benzo(ghi)perylene가 -0.660, -0.702로 강한 음의 상관성을 나타냈다. 위 상관분석의 결과에 따라 물리적인자가 pyrene

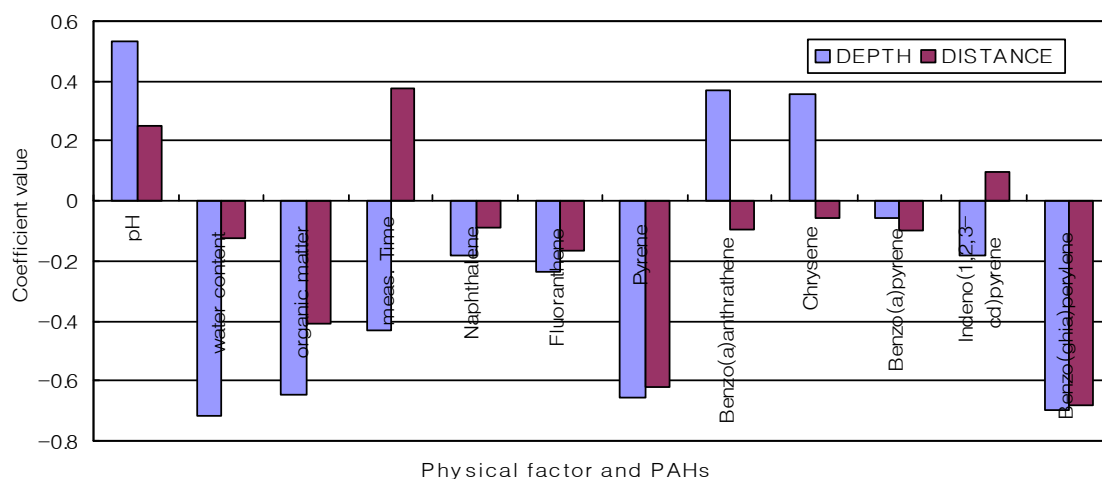


Fig. 7. The correlation coefficients of the physical factor and PAHs as the depth and distance in the NB site soil.

Table 6. The physicochemical factor characteristics at NB sites soil

Items	Statistics	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. dev.
pH		21	6.49	9.28	8.189	0.716
Water content(%)		21	2.33	20.39	10.681	5.108
Organic matter(%)		21	5.71	10.93	7.079	1.432
Distance(m)		23	0.30	30.00	10.796	9.704
Depth(cm)		23	0.03	0.20	0.080	0.058

$$y_{Pyrene} = -0.040 + 8.30 \times 10^{-5}x_1 + 0.015x_2 + 0.002x_3 + 3.37E-5x_4 + 0.002x_5 \dots\dots\dots (1)$$

$$y_{BghiP} = -0.056 - 0.002x_1 - 0.142x_2 + 0.003x_3 - 0.003x_4 + 0.028x_5 \dots\dots\dots (2)$$

x_1 : 도로로부터의 거리 x_2 : 시료채취 깊이 x_3 : 토양시료의 pH

x_4 : 도로로부터의 거리 x_5 : 시료채취 깊이 x_6 : 토양시료의 pH

Table 7. The correlation coefficients of the physi-chemical factors and PAHs

Items	Distance	Depth	pH	Water content	Ignition loss	Direction	Vehicles	Time	NPThL	ACNPL	FLURN	PHEN
Distance	1											
Depth	0.044	1										
pH	0.127	0.365**	1									
Water content	0.137	-0.114	-0.224*	1								
Ignition loss	0.004	-0.077	-0.378**	0.613**	1							
Direction	-0.141	-0.006	-0.297**	-0.011	0.147	1						
Vehicles	-0.152	-0.116	0.242*	-0.038	-0.160	-0.463**	1					
Sampling Time	0.233*	0.033	0.217*	0.114	0.013	-0.219*	-0.049	1				
NPThL	0.054	-0.064	-0.091	0.262**	0.213*	-0.021	0.006	0.059	1			
ACNPL	-0.065	-0.001	-0.045	-0.023	0.003	0.368**	-0.170	-0.132	0.056	1		
FLURN	-0.002	-0.039	-0.203*	0.165	0.163	-0.025	-0.150	0.075	0.079	-0.009	1	
PHEN	-0.130	-0.149	-0.144	0.134	0.447**	0.084	-0.037	0.062	0.067	0.159	0.346**	1
ANTHR	-0.126	-0.157	-0.124	0.108	0.413**	0.126	-0.007	0.030	0.029	0.165	0.066	0.941**
FLRTH	-0.139	-0.173	-0.301**	0.165	0.338**	0.092	-0.102	0.085	0.079	0.139	0.441**	0.702**
PYR	-0.203*	-0.192*	-0.242*	0.047	0.369**	0.063	0.008	0.059	0.049	0.083	0.378**	0.786**
BaA	-0.100	-0.047	-0.207*	0.020	0.312**	-0.005	0.009	0.027	0.098	0.074	0.282**	0.594**
CHRY	-0.147	-0.109	-0.245**	0.109	0.282**	0.140	-0.022	-0.061	-0.001	0.084	0.441**	0.636**
BbF	-0.056	-0.119	-0.231*	0.264**	0.442**	-0.064	0.051	0.049	0.116	-0.032	0.323**	0.532**
BkF	-0.158	-0.150	-0.278**	0.117	0.340**	0.180	-0.094	0.039	0.080	0.151	0.204*	0.668**
BaP	-0.140	-0.128	-0.157	0.101	0.298**	0.107	-0.051	0.120	0.055	0.070	0.235*	0.739**
I123P	-0.034	-0.046	-0.338**	0.134	0.248**	0.168	-0.265**	0.093	0.075	-0.020	0.696**	0.409**
DahA	0.016	-0.054	-0.264**	0.204*	0.226*	-0.035	-0.211*	0.105	0.053	-0.012	0.802**	0.337**
BghiP	-0.132	-0.086	-0.089	-0.104	0.280**	-0.114	0.038	0.008	0.084	-0.040	0.217*	0.531**

Table 7. (Continued)

Items	ANTHR	FLRTH	PYR	BaA	CHRY	BbF	BkF	BaP	I123P	DahA	BghiP
ANTHR	1										
FLRTH	0.609**	1									
PYR	0.695**	0.870**	1								
BaA	0.521**	0.642**	0.711**	1							
CHRY	0.576**	0.736**	0.748**	0.555**	1						
BbF	0.468**	0.518**	0.504**	0.687**	0.424**	1					
BkF	0.649**	0.761**	0.757**	0.682**	0.686**	0.582**	1				
BaP	0.692**	0.745**	0.795**	0.624**	0.672**	0.525**	0.886**	1			
I123P	0.241**	0.546**	0.485**	0.354**	0.522**	0.309**	0.413**	0.407**	1		
DahA	0.131	0.466**	0.370**	0.206*	0.374**	0.242**	0.135	0.159	0.732**	1	
BghiP	0.451**	0.308**	0.582**	0.527**	0.236**	0.289**	0.147	0.271**	0.237*	0.238*	1

** : significance level(both) 0.01. * : significance level(both) 0.05.

와 benzo(ghi)perylene의 농도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 선형회귀분석을 한 결과 다음과 같은 모형식으로 나타났다.

올림픽대로, 남산순환로변 등 전시료에 대한 상관성 분석결과 표 7과 같이 나타났다. 16 PAHs 중 pyrene 만이 유의수준 0.05에서 -0.203으로 음의 값으로, 앞서 언급한 남부순환로에서 -0.406 같은 음의 값을 나타냈다. 이것은 자동차로부터 배출된 배기가스 중의 PAHs 가 도로변 토양중 바로 흡착되지 않고 더 멀리 휘산되고 있음을 말하며 pyrene는 거리가 멀어질수록 다른 성분과 비하여 농도가 작아지므로 토양미생물이나 물리화학적 요인에 의하여 다른 성분으로 전환되고 있는 것으로 사료된다. 토양의 pH는 naphthalene, acenaphthylene, phenanthrene, anthracene, benzo(a)pyrene, benzo(g,h,i)perylene을 제외하고는 다른 성분과의 상관성을 보이고 있는데, 함수율과 유기물이 증가하면 pH는 감소하며, pH가 감소하면 PAHs의 농도가 높아지고 있는 것으로 나타났다. 함수율은 pH와는 상관성을 보이지 않았던 naphthalene과 상관성을 보이고 있고, 유기물은 대부분의 PAHs와 양의 상관성을 나타내 토양내 유기물 함유가 커질수록 PAHs의 농도가 증가할 것으로 사료된다. 그리고 2개의 벤젠링을

가진 naphthalene과 cyclopenta와 naphthalene이 결합된 acenaphthylene, acenaphthene등은 기체상으로 배출되어 멀리 휘산하거나 다른 성분으로 전환되어 토양중에서는 성분으로 오래 머물지 않는 것으로 나타났다. 이는 구조식에서 살펴보면 벤젠링이 선형적으로 배열되거나 만을 가진 구조가 토양에 흡착이 잘 되는 것으로 사료된다. 16 PAHs 중 naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene를 제외한 성분들은 상관성이 매우 유의하게 나타나 특징적으로 집단성을 보이고 있다.

표 8은 US EPA에서 선정한 우선오염물질 16 PAHs에 대한 물리적 특성을 나타낸 것이다. 이들 PAHs 화합물은 벤젠고리를 2~5개를 가지며 분자량 범위가 128.18~278.35로 증기압이 10~2 kPa에서 10~11 kPa에 이르는 반휘발성 유기화합물로 대부분 상온 상압에서 무색, 흰색, 연황록색의 입자상물질로 존재한다. 또한 소수성물질로 알려져 있으나 물에 대한 용해도는 ppb 또는 ppt 수준으로 물에 녹는 것으로 알려져 있다.

PAHs의 물리화학적 특성이 도로별 PAHs의 농도에 미치는 영향을 알아보기와 표 9와 같이 상관분석을 한 결과 끓는점이 높은 물질이 남산순환로 토양과 상관성을 보이는 것으로 나타났다.

Table 8. The physical-chemical characteristics of PAHs

Compounds	M.W	M.P(°C)	B.P(°C)	Vapor pressure (kPa, 25°C)	Water solubility (µg/L, 25°C)	Henry's law constant at 25°C (kPa · m ³ /mol)	n-Octanol-water partition coefficient (Log Kow)
Naphthalene	128.18	80.2	218i	1.1×10 ⁻²	31e.j	4.6×10 ⁻²	3.37
Acenaphylene	152.20	93	280	3.9×10 ⁻³	3.9d	1.5×10 ⁻¹	4.07
Acenaphthene	154.20	96	279	2.1×10 ⁻³	3.9i	9.1×10 ⁻³	3.93
Fluorene	166.23	118	295	8.7×10 ⁻⁵	4.64	2.1×10 ⁻²	4.18e
Phenanthrene	178.24	101	340	2.3×10 ⁻⁵	1.1e	2.6×10 ⁻²	4.57e
Anthracene	178.24	219	342	3.6×10 ⁻⁶	73i	8.6×10 ⁻³	4.5i
Fluoranthene	202.26	111	375	6.5×10 ⁻⁷	260	1.7	5.22
Pyrene	202.28	156	393	3.1×10 ⁻⁶	135	1.1×10 ⁻³	5.18
Chrysene	228.30	256	448	5.7×10 ⁻¹⁰	0.002		5.91
Benzo(a)anthracene	228.30	167	400	1.5×10 ⁻⁸	14	n.g.	5.61
Benzo(b)fluoranthene	252.32	168	481	6.7×10 ⁻⁸	1.2	5.1×10 ⁻³	6.12
Benzo(k)fluoranthene	252.32	217	480	2.1×10 ⁻⁸	0.76	n.g.	6.84
Benzo(a)pyrene	252.32	179	496	7.3×10 ⁻¹⁰	3.8	3.4×10 ⁻⁵	6.50
Dibenzo(a,h)anthracene	278.35	270	524	1.3×10 ⁻¹¹	0.5(27°C)	7.0×10 ^{-6a}	6.50
Benzo(ghi)perylene	276.34	278	545	1.4×10 ⁻¹¹	0.26	2.7×10 ⁻⁵	7.10
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	276.34	163	536	1.3×10 ⁻¹¹	62b	2.9×10 ⁻⁵	6.58

Table 9. The correlation coefficients between physical constant and t-PAHs

	M.W	M.P	B.P	Vapor	Kf	H	Kow	BS	DB	NB	NS	OP
M.W	1	0.737**	0.991**	-0.617**	-0.158	-0.109	0.979**	0.157	0.158	0.279	0.509	0.386
M.P		1	0.753**	-0.494	-0.281	-0.288	0.746**	0.068	0.200	0.405	0.393	0.440
B.P			1	-0.631*	-0.149	-0.128	0.981**	0.202	0.211	0.319	0.537**	0.433
Vapor				1	-0.079	-0.077	-0.611*	-0.338	-0.379	-0.046	-0.367	-0.291
Kf					1	0.832**	-0.158	0.350	0.315	-0.060	0.164	0.094
H						1	-0.076	0.222	0.233	-0.090	0.077	0.010
Kow							1	0.254	0.282	0.340	0.562*	0.479
BS								1	0.884**	-0.118	0.160	0.238
DB									1	0.214	0.421	0.585*
NB										1	0.836**	0.853**
NS											1	0.915**
OP												1

선오염원인 도로로부터 거리를 1 m 이내, 1~2 m, 2~3 m, 4~6 m, 6~8 m, 8~11 m, 11~15 m, 15~30 m로 8개 범위를 구분하여 각 성분에서의 검출률을 비교한 결과 그림 8과 같이 나타났다. 16 PAHs의 전 검출률은 4~6 m에서 19.9%로 가장 많은 성분들이 나타났고 그 다음으로 6~8 m에서 16.0%로 나타났다. 그러나 도로변에서 가장 가까운 지점들이나 가장 먼 15~30 m 지점에서는 각각 8.0, 3.7%로 너무 가까운 거리나 먼거리에서는 검출률이 작게 나타나, 이는 도로변 근접거리에서는 자동차흐름에 의한 바람 때문에 토양에 바로 흡착되지 않고 더 멀리 비산되어 토양입자에 흡착되는 것으로 사료된다.

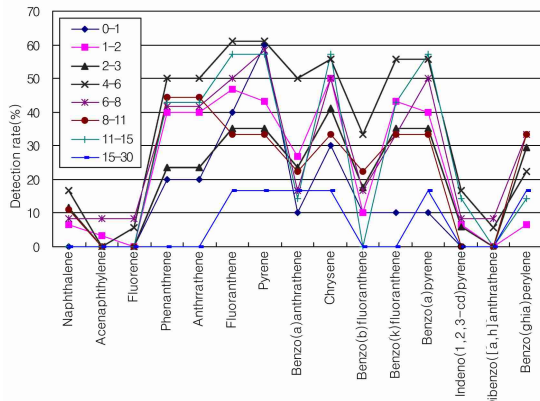


Fig. 8. The detection rates of the 16 PAHs as the distance range.

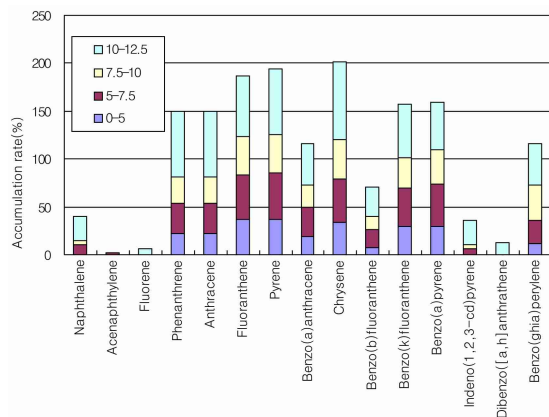


Fig. 9. The accumulation rate of PAHs as the ranges of the ignition loss.

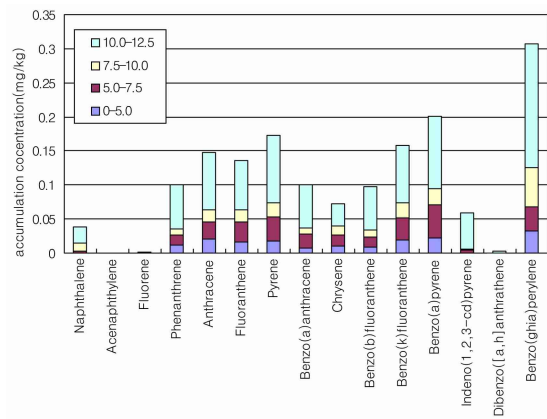


Fig. 10. The accumulation concentration of the PAHs according to increasing the organic matter in the soil.

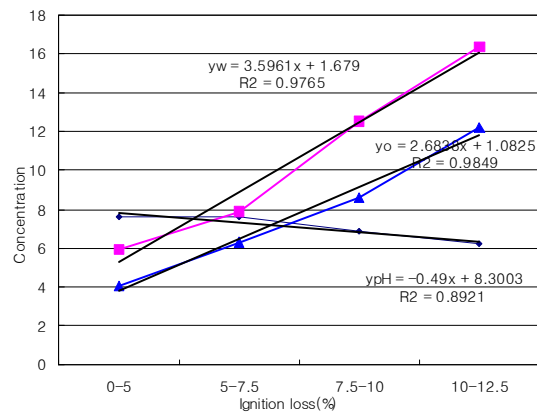


Fig. 11. The changes of pH and water content according to ignition loss in the soil.

유기물에 의한 PAHs 영향을 알아보기 위하여 강열감량을 측정하여 구간별로 검출율과 농도를 비교한 결과 그림 9~11과 같이 나타났다. 강열감량 10%보다 큰 값은 최대값이 12.83%로 대부분의 토양이 10%~12.5%의 범위를 보였으며 이 범위의 토양에서 PAHs가 가장 높은 40.3%를 보여 5%이하, 5~7.5%, 7.5~10%이하의 유기물을 가진 토양 20.5%보다 2배가량 높게 나타났다. 그리고 검출율이 적은 acenaphylene, fluorene, dibenzo(a,h)anthracene에서도 유기물이 많을 때 나타나고 있다. 이때 유기물은 $y_o = 5.6838x + 1.0825$, $R^2 = 0.9849$ 의 관계식을 보이며 증가하면

서 함수율은 $y_w = 3.5961x + 1.6790$, $R^2 = 0.9765$ 와 pH는 $y_{pH} = -0.49x + 8.3003$, $R^2 = 0.8921$ 의 변화를 보이고 있다. 즉 유기물이 많아지면서 함수율이 증가하고 유기물 분해에 따라 pH는 감소하는 것으로 나타나, 토양에 흡착되는 PAHs는 유기물이 많아지면서 함수율이 증가하고 토양의 산도가 높아지면서 흡착가능성이 높아지고 PAHs 농도도 높아질 것으로 사료된다.

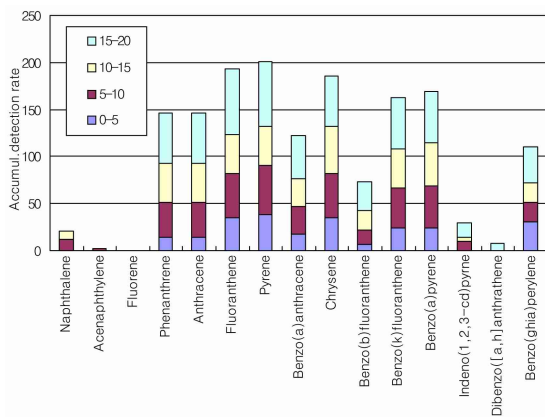


Fig. 12. The accumulation detection rate of PAHs as the changes of water content in the soil.

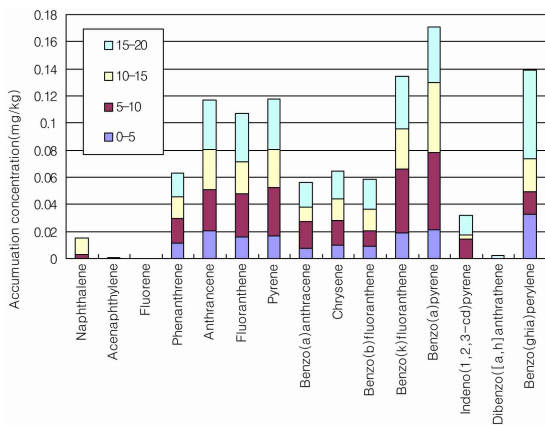


Fig. 13. The accumulation concentration of the 16 PAHs according to increasing the water content in the soil.

토양중 함수율의 증가에 따른 PAHs의 성분별 검출율과 축적농도를 비교한 결과 그림 12~14와 같이 나타났다. 토양의 함수율이 5%, 10%, 15%,

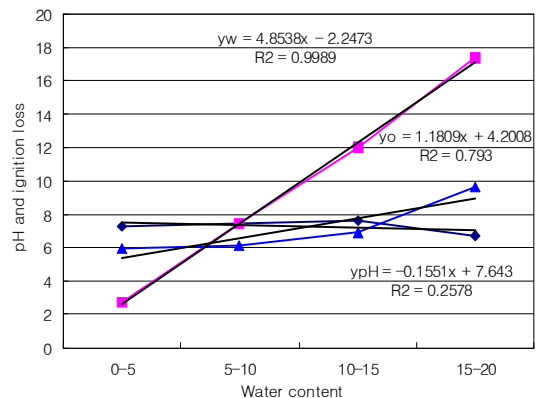


Fig. 14. The pH and ignition loss according to increasing the water content.

20%로 증가하면서 각 구간별 검출율은 각각 15.1, 25.4, 24.7, 34.8%로 증가하여 함수율이 PAHs의 토양축적에 영향을 미치는 것으로 나타났다. PAHs중 M.W. 154이하인 naphthalene, acenaphthalene, acenaphthene, fluorene과 M.W. 278인 dibenzo(a,h)anthracene은 그 검출율이 매우 작았고, M.W.가 178~276인 phenanthrene, anthracene, benzo(a)anthracene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene는 함수율이 증가하면서 검출률도 증가하는 것으로 나타났으며, benzo(ghi)perylene는 함수율이 5%이하에서도 5~15%이하의 토양에서보다 검출률이 높았다. 검출률에 비하여 토양축적 농도는 나프탈렌이 5~10, 10~15%의 함수율에서 검출률은 비슷하지만 농도는 0.003, 0.011 mg/kg으로 10~15% 함수율 토양이 높게 검출되었다. phenanthrene의 경우 검출률은 0~5%에서 가장 작고 5%보다 큰 구간에서는 함수율이 비슷하였지만 농도분포는 0.011~0.017 mg/kg으로 좁은 범위를 보였다. anthracene은 검출률에서는 phenanthrene과 비슷하지만 농도는 2개정도 높게 나타났다, chrysene의 경우 검출률은 fluoranthene은 약 200% 정도이지만 농도는 전반적으로 작은 농도를 보였다. 특히 benzo(a)pyrene는 검출률은 함수율 5%미만에서 다른 함수율 범위보다 1/2정도이지만 PAHs 농도합이 가장 크게 나타났다. 연구대상 PAHs 중 가장 무거운 분자량을 가진

benzo(ghi)perylene의 경우 검출률에 비하여 평균농도가 5-10% < 10-15 < 0-5 < 15-20% 순으로 0.016, 0.024, 0.032, 0.065 mg/kg 높게 나타났다. 이것은 검출률에 비하여 농도가 크게 나타나는 것은 적은 장소에서 검출되지만 고농도로 검출됨을 의미하고 반대로 phenanthrene 이나 chrysene와 같은 항목은 다른 항목에 비하여 검출률은 높지만 농도가 작은 경우 여러 장소에서 검출되는 것으로 나타났다. 이와 같이 수분은 benzo(k)fluoranthene와 benzo(a)pyrene에 대하여 5-10%에서 높은 농도가 높아지는 특이 반응을 하는 것으로 나타났다.

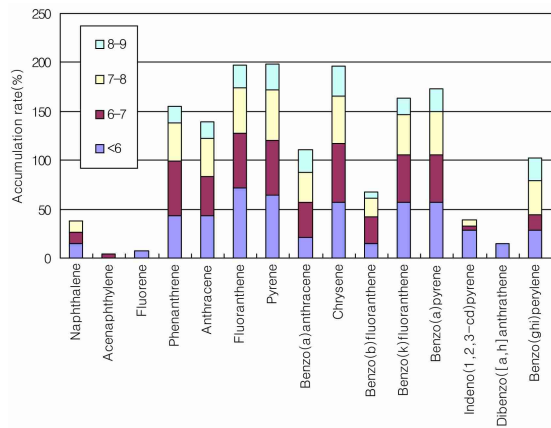


Fig. 15. The accumulation rate of the PAHs detection rate as the pH range.

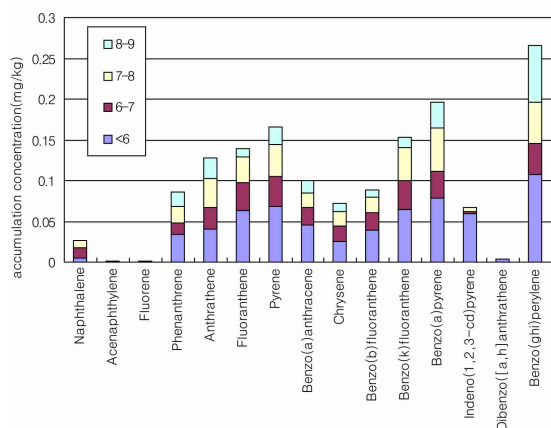


Fig. 16. The accumulation concentration of PAHs according to increasing the pH in the soil.

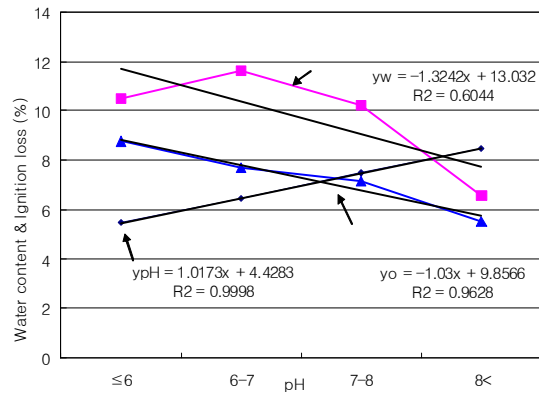


Fig. 17. The water content and ignition loss according to increasing the pH.

16 PAHs를 토양의 pH 구간별로 검출률과 농도, 유기물과 함수율을 비교한 결과 그림 15~17과 같이 나타났다. 2~3개의 벤젠링을 가진 naphthalene, acenaphthalene, fluorene는 pH 8 이하에서 낮은 검출률을 보이며 축적농도가 0.025 mg/kg 이하로 나타났고, dibenzo(a,h)anthracene는 pH 6 이하에서만 나타났다. 다른성분은 pH 7이하에서 50%이상 대부분 검출되었으며 농도범위는 pH 6이하에서 다른 pH 범위에 비하여 높게 나타났다. 또한 유기물과 함수율이 증가하면서 pH는 감소하는 것으로 나타나 PAH는 토양이 산성화되면서 토양에 흡착이 더 잘 되는 것으로 나타났다.

결론

서울지역 선오염원인 주요 간선도로변 토양중 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons:PAHs)에 대한 토양의 물리화학적 특성에 따라 토양중 분포특성을 규명하기 위하여 올림픽대로등 6개도로변에서 채취한 토양을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 도로변 토양에 따라 수소이온농도와 통행량은 유의수준 0.01에서 매우 유의하게 나타나 집단간에 차이가 있는 것으로 나타났으나 함수율이나 유기물량은 도로에 따라 유의성을 나타내지 않았다.

2. Fluorene는 남산순환로(NS)에서 2.145 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 가장 높게 검출되었으며, phenanthrene는 NS>BS>DB>OP 순으로 46.945, 34.252, 27.307, 18.223 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 으로 나타났다. Naphthalene과 3개의 링을 가진 acenaphthylene, fluorene는 1.1%의 검출율을 보였고 acenaphthene은 검출되지 않았으며, pyrene>fluoranthene>chrysene>benzo(a)pyrene 순으로 각각 43.3, 41.0, 39.6, 35.8%로 나타났다.
3. 차량통행량이 더 많은 올림픽대로에서 naphthalene, pyrene, benzo(a)anthracene, benzo(e)fluoranthene, indeno(1,2,3-c,d)pyrene과 benzo(ghi)perylene가 동부간선도로보다 각각 3.17, 1.154, 1.396, 2.884, 1.384, 3.916배 높은 농도를 보였다.
4. 도로변으로부터 거리가 멀어질수록 pH가 증가하고, 유기물과 PAHs 성분중 pyrene와 benzo(ghi)perylene는 상관계수가 각각 -0.406, -0.622, -0.683를 보이며 감소하는 것으로 나타났으며 이외의 PAHs는 상관성이 나타나지 않았다. 또한 토양층위가 깊어질수록 pH가 양의 상관성을 나타냈으며, 유기물과 함유율이 각각 -0.714, -0.645, PAHs 성분중 pyrene와 benzo(ghi)perylene가 -0.660, -0.702로 강한 음의 상관성을 나타냈다.
5. 16 PAHs 중 naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene를 제외한 성분들은 상관성이 매우 유의하게 나타나며 집단성을 보이는 것으로 나타났다.
6. 16 PAHs의 전 검출률은 도로로부터 이격거리가 4~6 m에서 19.9%로 가장 많은 성분들이 나타났고 그 다음으로 6~8 m에서 16.0%로 나타났다.
7. 토양중 유기물이 10~12.5%에서 PAHs가 가장 높은 40.3%를 보여 5%이하, 5~7.5%, 7.5~10%이하의 유기물을 20.5%토양보다 2배가량 높게 나타났다.

참고문헌

1. Roberto A, Kaura P, Jose LM and Franco AM : Anaerobic PAH degradation in soil by mixed bacterial consortium under denitrifying conditions. Chemosphere, 60 :1231~1236, 2005.
2. US EPA : Polycyclic Aromatic Hydrocarbon chemical screening levels. Response to 2005 Hurricanes(12th, 2006).
3. Amit M and Ajay T : Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) concentrations and related carcinogenic potencies in soil at a semi-arid region of India. Chemosphere, 65:449~456, 2006.
4. Bucu S, Monragues M, Sergent M, Doumenq P and Mille G : An experimental design approach for optimizing polycyclic aromatic hydrocarbon analysis in contaminated soil by polyser-gas chromatography-mass spectrometry. Environment Research, 104:209, 2007.
5. Hartmut W and Hans S : The formation of PAH oxidation products in soils and soil/compost mixtures. Chemosphere. 35(8):1681~1682, 2005.
7. 김상조, 정용현, 옥곤 : 창원시 토양중 다환방향족 탄화수소화합물의 농도수준 및 분포특성. 한국환경분석학회지, 3(3):171~175, 2000.
8. Nam JJ, Song BH, Eom KC, Lee SH and Smith A : Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea. Chemosphere, 50:1281~1289, 2003.
9. 이승엽, 김수진 : 유기점토에 의한 다환방향족 탄화수소와 카드뮴의 흡착특성 연구. 자원환경지질학회지, 36(3):171~176, 2003.
10. 김종훈 : 하수슬러지와 토양중 다환방향족 탄화수소의 정량, Analytical science & Technology, 13(3):357~367, 2000.
11. 김태승, 신선경 : 환경중의 다환방향족탄화수

- 소류의 배출 및 분석현황. 한국분석과학회지, 14(4):47, 2001.
12. Dionex application note 313 : Extraction of PAHs from environmental samples by accelerated solvent extraction(ASE). meets the requirements of U.S. EPA, 3545.
 13. 박성현, 조신섭, 김성수 : 통계자료분석을 위한 한글 아카데미. SPSS 아카데미, p85~223, 1999.
 14. EURO WHO. 5.9 Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Air quality guidelines, 2:1~24, 2000.
 15. Colin B : Environment chemistry. p259.
 16. 최은선 : 도로터널을 이용한 자동차의 PAHs 발생특성에 관한 연구. p36, 2004.
 17. Robert AM : Environmental analysis and remediation. 5:3814~3820, 1998.
 18. Bohm H, Jander H and Tanke D : PAH growth and soot formation in the pyrolysis of acetylene and benzene at high temperatures and pressures : modeling and experiment. Twenty-seventh Symposium (international) on Combustion Institute, p1605~1612, 1995.