

회귀분석에 의한 토양내 PAH 농도 예측에 관한 연구

김종오¹ · 박수호^{2*} · 이우범²

¹목포대학교 환경교육과

²전남대학교 환경시스템공학과

Prediction of PAH Concentration in Soil using Regression Analysis

Jongo Kim¹ · Soo-Ho Park^{2*} · Woo-Bum Lee²

¹Department of Environmental Education, Mokpo National University

²Department of Environmental System Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

Regression analyses were conducted for prediction of benzo(a)pyrene (BaP) and total polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils. Dimensionless units were applied after each PAH was divided by naphthalene (Nap) for the regression analyses using a previously published Swiss data set or all data sets, including Chinese and Brazilian. A strong correlation was found between BaP/Nap ($R^2=0.95$) or Σ PAH/Nap ($R^2=0.99$) and Pyr/Nap ratios from the Swiss data set. When the developed prediction equation was applied to other measurements to validate its accuracy, there was great agreement between the data and predicted values. This model could be used as a useful tool for the calculation of average BaP and Σ PAH in specific regions without additional tests.

Key words : BaP(benzo(a)pyrene), Nap, PAHs, Pyr(Pyrene), Regression analysis, Soil

1. 서 론

다환방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)는 물질의 불완전 연소과정에서 부산물로 생성되는데, 자연 발생원에는 화산, 숲의 화재 등이 있고, 인위적 발생원으로는 화석연료를 사용하는 자동차의 배출가스, 화력발전소의 석탄연소, 자동차 폐오일, 담배연기 등이 있다(MOE, 2012; MFDS, 2010). PAHs에는 100종류 이상이 존재하며 독성이 알려진 화합물로는 benzo(a)pyrene(BaP) 외 50종으로 밝혀졌고, 미국 환경청(US EPA, 2016)은 발암성에 근거하여 PAHs중 우선 대상화합물로 16종을 정하였다. 특히, BaP와 dibenz(a,h)anthracene (DahA)는 가장 독성이 강한 것으로 간주하여 미국 환경청에서는 독성 계수를 1.0으로 부여하였다(US EPA, 2016).

화석연료가 연소되는 과정에서 여러 종류의 PAHs 모두 배출되는데, 어떤 연료의 연소기원에 의해서 어떤 화합물이 주로 생성되는지 흥미 있는 연구가 발표되었다. 석유

제품 연소에서 배출되는 BaP, Pyrene(Pyr)는 발생농도가 서로 연관성이 있는 것으로 나타났다(Catallo, 1998; Chagger et al., 1999). Chagger et al.(1999)은 여러 종류의 석탄이 불완전 연소할 경우 상대적으로 높은 농도인 Pyr이 배출되고 BaP도 함께 나오는 것으로 발표했다. Catallo(1998)는 플라스틱 제조에 사용되는 석유화학제품인 1,3-butadiene 연소과정에서 Pyr과 BaP가 생성된다고 하였다. 1g의 1,3-butadiene이 연소하여 Pyr이 99 ug과 BaP가 58 ug이 배출되며 총 PAHs는 353 ug이 발생한다고 설명하였다. Christie et al.(2012)은 여러 종류의 연료(Jet A-1, Sasol 합성연료, Shell 등유, Jet A-1/GTL 혼합등유)에서도 PAHs가 발생하는 조사를 하였으며 연료량과 이들 농도 연관성을 발표하였다. 연료 연소과정에서 발생된 PAHs가 토양에 침전되는데 배출원이 어디인지를 추적하는 연구도 활발하게 진행되었다(Sofowote et al., 2008; Wang et al., 2013; Xu et al., 2014). PAHs의 연소기원을 추적하기 위해서 통계적인 주성분분석, 요인

*Corresponding author : shpark10@hanmail.net

Received : 2017. 1. 2 Reviewed : 2017. 2. 6 Accepted : 2017. 4. 3

Discussion until : 2017. 6. 30

분석, 다중회귀분석이 시도되어 화석연료에 의한 연소가 원인인지 산불과 같은 자연발생원 인지를 구분하는 논문이 발표되었다(Yunker et al., 2002; Ray et al., 2008; Zhang et al., 2012). PAHs의 토양으로의 주요 유입경로는 대기로부터의 확산오염원에 의한 침전인데 국내외적으로 대기중 농도분포, 발생원 추적, 통계적 분석에 관한 많은 연구가 발표되었다(Khalili et al., 1995; Simcik et al., 1999; Guo et al., 2003).

통계적 분석에 의한 발생원 추적연구는 많으나 PAHs 농도를 예측하는 연구가 없는 상황에서, 기존에 발표된 개별적 PAH 측정 자료를 사용하여 BaP와 ΣPAH의 예측을 위하여 선형회귀 분석을 시도하였다. 이는 화석연료의 연소기원 과정에서 발생하는 PAH 화합물 간의 연관성과 예측 가능성을 알아보려는데 목적이 있다. 회귀분석은 토양내 Pyr 농도에 따라 두 가지로 나누었는데 $0 < \text{Pyr} < 100 \text{ ug/kg}$ 인 경우(스위스 데이터)와 $0 < \text{Pyr} < 400 \text{ ug/kg}$ (전체 데이터)로 구분하였다. 개발된 회귀식을 사용하여 PAH 농도 예측에 적합한지 검증과 적용 연구를 동시에 수행하였다. 적용 연구는 본 실험에서 분석한 전라남도 지점의 17개 토양 시료를 채취하여 측정한 PAH 농도를 이용하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 기존발표 데이터

Table 1은 기존에 발표된 조사이며 PAH 측정을 한 국가, 시료개수, 통계 분석을 위한 자료 개수를 요약한 것을 보여주고 있다. Bucheli et al.(2004)이 발표한 스위스 23개 지점만 개별적 16종류 PAH를 발표하였고 그 외 지역인 20개 데이터는 지역별 PAH 평균 결과를 제시하였다. Jiang et al.(2009)은 중국 상해를 도로지역, 그린벨트지역, 공원, 주거 및 상업지역으로 나누어 각각 평균값, Peng et al.(2011)은 북경의 총 233개 도시 지점을 전체 평균하

여 16종류 PAH를 1개씩 발표하였다. 홍콩(Zhang et al., 2006)과 브라질(Wilcke et al., 2003) 자료는 지역 특성을 나누어 각 지역별로 5개 및 8개 나누어 평균 PAH 농도를 나타내었다. Nam et al.(2003)은 한국 전 국토를 대상으로 226개 지점 토양을 조사하여 1개 평균값을 발표하였다.

2.2. 본 연구 시료

본 연구의 회귀식 적용 연구를 위하여 산업단지가 위치한 전라남도의 서남권(대불산단 주변지역) 토양시료를 분석하였다(Park et al., 2016). 시료는 환경부의 토양오염측정망을 대상으로 하였으며(MOE, 2012) 세부적으로는 6개 사람활동지역(주거 및 상업지역), 3개 오염영향지역(도로, 철도 등), 산업단지 지역 및 배경농도 지역은 각각 4개로 권역별 특성을 고려한 여러 배출원의 영향이 예상되는 17개 지점이다.

2.3. 시료준비 및 분석

시료의 채취는 각 지점에서 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 의 크기로 시료를 채취하였다. 토양 시료 채취는 PAHs가 대부분 토양 표면에 강하게 흡착하고 있음을 감안하여 토양 표층을 채취하였으며, 채취한 토양은 뚜껑이 테프론으로 이루어진 병에 담아서 밀봉하고 PAHs 분석 전까지 -20°C 에서 보관하였다. 토양 중의 PAHs를 준비하는 과정은 크게 용매추출과 정제 단계로 이루어졌다. 채취한 시료는 2~3일 동안 실온에서 방치하여 건조 후 표층의 조대 물질을 제거하였다. 건조된 시료는 2 mm 체로 거른 후 4°C 에서 저장 보관하였다. 균일화 된 시료를 전자저울로 20 g을 달아 분석용 시료로 하였다. 용매추출에서는 균일화된 시료를 셀룰로스 팀블에 넣고 여기에 내부표준물질을 첨가하였다. 이를 속실텍 추출장치에 담고 아세톤 : 헥산(1 : 1v/v) 혼합 유기용매 200 mL를 이용하여 1회 용매 순환속도가

Table 1. Location of the study sites, number of soil samples, soil type, and literature sources

Site location (Functional region)	No. of samples	Soil type	Data applied	Reference
Swiss, Urban area (Swiss Soil Monitoring Network)	23	Each region	Each sample	Bucheli et al. (2004)
Republic of Korea (Seoul; Metropolitan, mountain, inland, coastal, plain, and iron processing plant regions)	226	Each region	Mean	Nam et al. (2003)
China, Beijing (Urban area)	233	Each region	Mean	Peng et al. (2011)
China, Shanghai (main roadside, greenbelt, park, residential and commercial regions)	55	TOC: 3.04-7.61%	Each region mean	Jiang et al. (2009)
Hong Kong (woodlands, grasslands, farmland, wetland, urban parks)	53	TOC: 0.53-2.92%	Each region mean	Zhang et al. (2006)
Brazil (Amazon; Terra firme, V rzea, and Igap, Pantanal, Cerrado, Mata Atlntica, and Caatinga regions)	46	TOC: 1.4-5.3%	Each region mean	Wilcke et al. (2003)

4-6분이 되도록 속실텍 추출장치 온도를 맞추고 16시간 이상 추출하였다. 속실텍 추출장치로 추출된 혼합 유기용매 전량을 회전식 증발농축기로 약 30°C의 수욕상태에서 약 1~2 mL까지 농축하고 이를 3회에 걸쳐 헥산을 이용하여 대체하였다. 그리고 농축된 용액을 실리카겔 칼럼을 이용하여 정제하였다. 16종류의 PAHs 화합물을 검출하기 위한 기기는 GC-MS(Agilent 6890, 5973N, USA)를 사용하였다. 칼럼은 모세관 칼럼인 HP-5(Agilent, USA)를 사용하였으며, 칼럼(내경 0.25 mm, 필름두께 0.25 μ m, 길이 30 m)은 5% phenyl, 95% methyl polysiloxane으로 충전 되어 있는 것을 이용하였다. 칼럼 승온 조건은 처음 80°C에서 1분 동안 머무르게 하였고, 이후 1분당 5°C씩 올려 280°C까지, 10분당 10°C씩 올려 300°C까지 올린 후 10분간 머무르게 하였다. 시료 주입방법은 1 μ L를 Splitless 주입법으로 하였고, 운반기체는 헬륨(99.999%)을 이용하여, 분당 1.0 mL로 흘려주었다. 검출하는 방법은 특정 질량을 가지는 이온만을 선택하여 검출하는 방법인 SIM(Selected Ion Monitoring) 조건을 이용하였다. 시료의 정성 및 정량분석은 16종의 PAHs가 혼합된 표준용액을 이용하여 시료 각 성분의 체류 시간과 피크 면적을 대체표준물질의 피크 면적과 비교한 내부 표준법에 의해서 수행하였다. 검출한계는 2.5~9.9 pg이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기존발표 PAHs 분포

기존에 발표된 6개 지역 개별 PAH의 43개 데이터를 사용하여 회귀분석을 시도하기 전에 이 화합물 분포와 특성을 검토하였다. 발표된 논문에서 각 시료채취 지점별 개별 PAH 자료는 매우 적었으며 스위스 지역만 유일하게 23개 지점의 16종류 개별 농도 수집이 가능하였고(Bucheli et al., 2004), 나머지 지역인 20개 데이터는 지역 평균값이다.

Fig. 1에서는 5개 지역의 평균 Pyr/Nap(naphthalene)와 BaP/Nap 농도비를 보여주고 있는데 중국 상해지역 결과(Jiang et al., 2009)가 가장 높은 Pyr/Nap인데 15 이상을 나타내고 있다. 상해 공업지역의 55개 토양 시료를 분석하였는데 평균 Pyr, BaP, Nap 농도는 각각 397, 189, 25.5 μ g/kg로 다른 지역에 비해 매우 높은 수준으로 많은 화석연료가 연소되는 도로변 및 공장 인근의 시료가 원인으로 여겨진다. 스위스의 시료채취 지점은 23개 지점이었고 평균 Pyr, BaP, Nap 농도는 각각 26, 10.7, 7.7 μ g/kg이었다. 스위스 지역의 Pyr/BaP비는 1.3이었는데

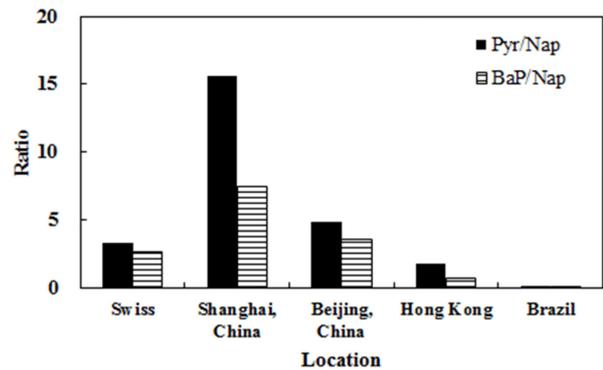


Fig. 1. Ratios of Pyr/Nap and BaP/Nap at five locations.

Catallo(1998)가 조사한 연료연소에 의한 Pyr/BaP비 1.7과 유사하였다. 다른 모든 지역에서는 Pyr/BaP비가 1 이상이었다. 홍콩(Zhang et al., 2006)과 브라질(Wilcke et al., 2003)의 Pyr/Nap와 BaP/Nap 농도비는 다른 3개 지역에 비해 낮게 검출되는 것으로 발표하였다. 이와 같이, 중국 상해지역의 개별 PAH 농도가 다른 지역에 비해 수십~수백 배 높은 값을 보인 특이성을 나타내고 있으며 Pyr이 100 μ g/kg 이상인 데이터는 6개 이었다.

3.2. 본 연구 PAHs 분포

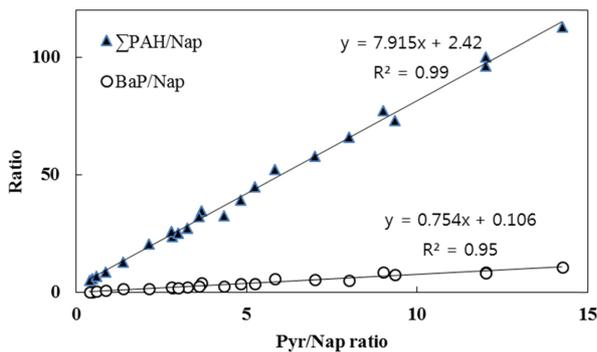
전라남도 산업단지 인근지역의 17개 지점 토양시료를 분석하였다. 각 권역을 세분화하면 오염영향지역, 산업단지, 사람활동지역, 농촌지역으로 구분할 수 있다. Table 2는 16종류 PAHs의 농도 분포를 나타내고 있다. 서남권 토양 중 PAHs 총 농도는 9.7~132.8 μ g/kg dry(평균 28.0 μ g/kg dry)나타났다. 측정목적에 따라 분류 할 경우, 배경농도는 17.1~24.8 μ g/kg(평균 20.2 μ g/kg), 오염영향지역은 17.4~45.8 μ g/kg(평균 34.5 μ g/kg), 산업단지 지역은 17.1~40.5 μ g/kg(평균 27.6 μ g/kg), 사람활동지역은 8.2~132.8 μ g/kg(평균 30.4 μ g/kg)으로 분포되었다. 평균 총 농도를 비교하면 오염영향지역이 가장 높은 농도 분포를 보였고, 산업단지보다 평균 25% 높게 측정되었다. Phenanthrene(Phe)가 가장 높은 농도인 4 μ g/kg로 조사되었고, 평균 Pyr, BaP, Nap 농도는 각각 2.5, 2.1, 2.3 μ g/kg이었다. Pyr, Phe가 상대적으로 높게 검출되어 이 지역이 화석연료 연소에 의한 지역임을 알 수 있었다(Yunker et al., 2002).

3.3. 농도비에 따른 선형회귀분석

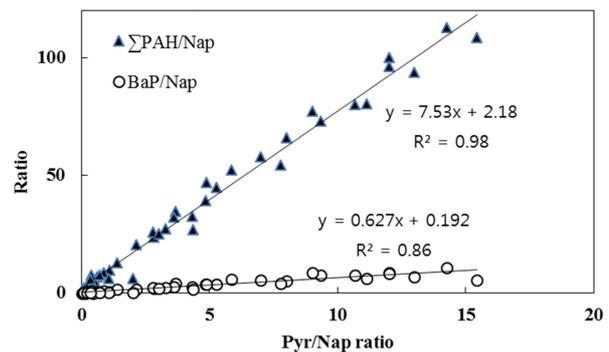
먼저 이미 발표된 43개 지역의 Pyr/Nap 농도비, BaP/Nap 농도비, Σ PAH/Nap 농도비를 이용하여 단순 선형회

Table 2. Individual PAH concentration in Jeollanamdo soils

PAHs		West region (ug/kg)			
		Range	Mean	Median	SD
Nap	Naphthalene	1.8-3.4	2.3	2.1	0.6
Acy	Acenaphthylene	ND-1.5	0.2	0.0	0.4
Ace	Acenaphthene	0.4-1.0	0.8	0.8	0.2
Fl	Fluorene	0.5-1.5	1.0	0.9	0.4
Phe	Phenanthrene	2.0-6.9	4.0	4.0	1.6
Ant	Anthracene	0.2-3.0	0.7	0.6	0.7
Flu	Fluoranthene	0.8-13.7	3.4	2.3	3.1
Pyr	Pyrene	0.5-14.9	2.5	1.6	3.3
BaA	Benz(a)anthracene	0.2-10.5	1.3	0.5	2.4
Chr	Chrysene	ND-13.4	2.1	0.9	3.1
BbF	Benzo(b)fluoranthene	0.6-18.0	2.9	1.6	4.1
BkF	Benzo(k)fluoranthene	ND-7.8	1.1	0.6	1.8
BaP	Benzo(a)pyrene	0.5-14.0	2.1	1.2	3.1
InP	Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0.4-12.4	1.6	0.7	2.8
DahA	Dibenz(a,h)anthracene	ND-2.9	0.4	0.3	0.7
BghiP	Benzo(g,h,i)perylene	0.4-10.2	1.5	0.8	2.2

**Fig. 2.** Linear regression results for BaP/Nap and Σ PAH/Nap according to the Pyr/Nap ratio using the Swiss dataset.

귀분석을 시행하였다. 통계분석에서 BaP와 Nap는 역비례를 보였고, Nap는 2-ring으로 가장 낮은 분자량의 화합물 이면서 연소기원과 자연연소 모두에서 검출되는 특징이 있어 적용하였다. 회귀분석은 토양내 Pyr 농도에 따라 두 가지로 나누었는데 $0 < \text{Pyr} < 100 \text{ ug/kg}$ 인 경우와 $0 < \text{Pyr} < 400 \text{ ug/kg}$ 로 구분하였다. 이는 Pyr 농도가 대부분 100 ug/kg 이하이고 6개 데이터만 고농도 자료이어서 고농도를 포함할 경우 상관성에 차이가 있어 구분하였다. 스위스 실험결과(Bucheli et al., 2004)인 23개 데이터가 이용된 $\text{Pyr} < 100 \text{ ug/kg}$ 조건의 경우, Fig. 2에서와 같이 Pyr/Nap과 BaP/Nap 사이에 매우 높은 상관관계($R^2=0.95$, $p < 0.001$)를 보였다. 통계분석에는 마이크로소프트사의 Excel(2013, USA)이 사용되었으며 통계적 중요성($p <$

**Fig. 3.** Linear regression results for BaP/Nap and Σ PAH/Nap according to the Pyr/Nap ratio using all data sets.

0.001)이 적용되었다.

다음은 발표된 고농도 Pyr가 포함된 전체 데이터를 사용하여 다시 시도한 결과($0 < \text{Pyr} < 400 \text{ ug/kg}$)를 Fig. 3에 나타내었다. Pyr/Nap과 BaP/Nap($R^2=0.86$, $p < 0.001$), Pyr/Nap과 Σ PAH/Nap($R^2=0.98$, $p < 0.001$) 사이에 높은 상관성을 보여주었다. Table 3은 두 조건에 따른 회귀 분석식을 요약한 것이다. 모든 조건에서 상관계수는 0.86 이상이었다.

앞에서 언급하였듯이, 연료연소에서 배출되는 PAH 농도는 서로 연관성이 있어 개별 PAH 농도가 유사하게 토양에 흡착되어 검출되는 것으로 여겨진다. Pyr과 함께 고농도로 검출된 Phe에 의한 회귀 분석을 추가로 수행한 결과를 Fig. 4에 나타 내었다. Phe는 Pyr, BaP와 함께 연소기원으로 알려져 있어 통계적 연관성을 조사하였다.

Table 3. A proposed regression equation for BaP/Nap and ΣPAH/Nap ratios at different Pyr/Nap in soil

PAH	Regression equation	R ²	Data used for regression
BaP	$y = 0.754x_1 + 0.106$	0.9531	Swiss dataset
BaP	$y = 0.627x_1 + 0.192$	0.8658	All datasets
ΣPAH	$y = 7.915x_1 + 2.42$	0.9958	Swiss dataset
ΣPAH	$y = 7.53x_1 + 2.18$	0.9845	All datasets

R²: Correlation coefficient.

y: BaP/Nap or ΣPAH/Nap, x₁: Pyr/Nap.

A statistical significance ($p < 0.001$) was utilized for all regression equations.

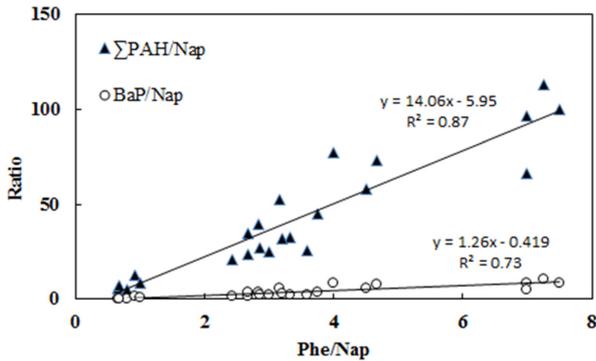


Fig. 4. Linear regression results for BaP/Nap and ΣPAH/Nap according to the Phe/Nap ratio using the Swiss dataset.

그림에서와 같이, Phe/Nap비와 상관계수가 BaP/Nap ($R^2=0.73$, $p<0.001$), ΣPAH($R^2=0.87$, $p<0.001$)로 Pyr/Nap 비에 비하여 약간 낮았다.

본 연구에서 개발된 회귀식은 PAH중에서 가장 독성이 높은 것으로 알려진 BaP와 ΣPAH 농도 예측을 대략적으로 빠르게 할 수 있는 식이 될 것이다. 고분자 PAH인 Pyr과 BaP는 낮은 휘발성과 높은 옥탄올-물 분배 계수의 특성을 갖고 있어 저분자 PAH에 비하여 토양에 오래 동안 잔류하며 흡착되는 것으로 보고되고 있다(Yang et al., 1991). 그리고 토양내 고분자 PAH 농도는 대기에 존재하는 입자상물질 PAH와 밀접한 연관성이 있는 연구도 발표되었다(Nam et al., 2003; Zuo et al., 2007).

3.4. 회귀식 검증

본 연구에서 개발된 회귀식을 이용하여 이미 발표된

PAH에 검증과정을 시도하였다. Table 4에서와 같이, 하나는 낮은 Pyr(26 ug/kg)이 검출된 한국의 발표자료(Nam et al., 2003)이고 다른 하나는 높은 농도(183 ug/kg)인 중국의 발표결과(Li et al., 2006)이다. 토양에서의 BaP와 ΣPAH 농도가 Pyr 농도에 따라 예측식이 결정되기 때문에 Pyr 조건에 따라 서로 다른 회귀식이 사용되었다. 높은 Pyr 조건($0 < Pyr < 400$ ug/kg, 전체 데이터)이 사용된 중국 결과의 경우, 실제 측정된 BaP와 계산된 BaP는 각각 105 ug/kg, 129 ug/kg으로 상대오차는 23.2%로 차이가 있었다. 실제 측정된 ΣPAH와 산출된 ΣPAH는 각각 1,636 ug/kg과 1,543 ug/kg으로 매우 유사한 결과를 얻었다. 낮은 Pyr 조건($Pyr < 100$ ug/kg, 스위스 데이터)의 경우, BaP와 ΣPAH의 상대오차는 각각 36%와 12%이었다. Table 4에 요약한 것과 같이, 회귀식을 이용할 경우 전체 적 상대오차는 -5.6~36%이었다. 비록 BaP나 ΣPAH 예측에 어느 정도가 한계가 있을 수 있으나 개발된 회귀식을 이용할 경우 추가적인 실측 없이 PAH를 빠르게 대략적인 값을 계산 할 수 있는 장점이 있을 것으로 여겨진다.

3.5. 회귀식 적용

이번에는 개발된 회귀식을 본 연구에서 측정한 전라남도 지역의 PAH 농도에 적용하였다. 앞에서 언급하였듯이, 이 지역의 Pyr 농도가 0.5~14.9 ug/kg(평균: 2.5 ug/kg) 범위이어서 낮은 Pyr조건($Pyr < 100$ ug/kg)을 적용하여 BaP와 ΣPAH의 예측농도를 결정하였다. Fig. 5는 측정된 것과 예측한 BaP 농도를 나타낸 비교 그림이다. 그림에서

Table 4. Comparison of measured and calculated PAHs from regression equations

PAH	Measured (ug/kg)	Calculated (ug/kg)	Relative error (%)	Data used for regression	Measured reference
BaP	16.3	22.1	36	Swiss dataset	Nam et al., 2003
BaP	105	129	23.2	All datasets	Li et al., 2006
ΣPAH	235	264	12	Swiss dataset	Nam et al., 2003
ΣPAH	1,636	1,543	-5.6	All datasets	Li et al., 2006

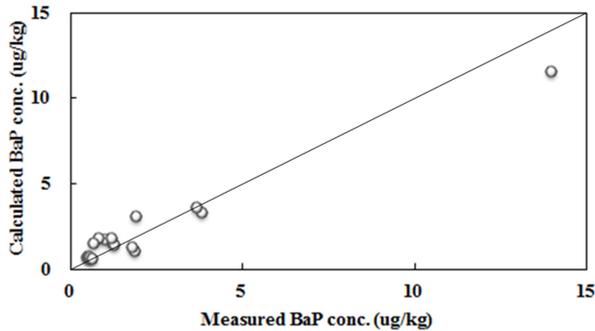


Fig. 5. Comparison of measured and calculated BaP.

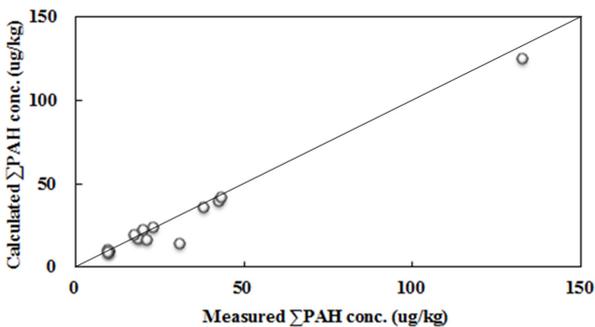


Fig. 6. Comparison of measured and calculated ΣPAH.

실선은 모든 측정값과 예측값이 정확히 일치 할 경우 ($R^2=1.0$)를 나타내는 이상적인 45° 선을 의미한다. 그림에서와 같이, 예측한 BaP는 측정한 것과 비교하여 매우 유사한 결과를 보이고 있다. Fig. 6은 측정한 것과 예측한 ΣPAH 농도를 나타낸 그림이다. 이 경우도 예측한 ΣPAH 농도는 실측한 것과 아주 비슷한 경향을 보였다. 평균 BaP와 ΣPAH 측정 농도는 각각 2.1 ug/kg, 28 ug/kg인데, 예측한 값은 2.2 ug/kg, 26 ug/kg으로 의미 있는 유사한 결과로 예측되었다. 따라서 Pyr/Nap비를 적용하여 추가적인 시료분석 없이 BaP나 ΣPAH 농도를 대략적으로 알 수 있는 도구로 사용 할 수 있다. 또한 회귀식에 의한 연구 결과, Pyr과 BaP가 서로 밀접한 상관성이 높은 것으로 분석되어 이들 화합물 모두 연소기원 형태로 분류로 추정하는 결과도 얻었다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 발표된 PAH 데이터 세트를 이용하여 BaP와 ΣPAH의 예측을 위하여 선형회귀 분석을 수행하였다. 회귀분석 결과, 스위스 데이터가 이용된 $\text{Pyr} < 100 \text{ ug/kg}$ 조건의 경우, Pyr/Nap 과 BaP/Nap ($R^2=0.95$), Pyr/Nap 과 $\Sigma\text{PAH/Nap}$ ($R^2=0.99$) 비 사이에 아주

밀접한 상관성을 보여주었다. 그리고 개발된 회귀식을 적용한 다른 PAH 측정값에 검증과 적용 연구에서 매우 높은 예측값을 얻을 수 있었다. 통계적 분석에서 Pyr과 BaP가 서로 상관성이 높은 것으로 밝혀져 이들 화합물 모두 연소기원 형태로 분류 할 수 있을 것으로 여겨진다. 결론적으로, 이들 회귀식을 적용 할 경우 어느 지역이든 관계없이 Pyr와 Nap 농도만을 이용하여 추가적인 시료분석 없이 BaP나 ΣPAH 농도 빠르게 알 수 있는 장점이 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 2016학년도 목포대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- Bucheli, T.D., Blum, F., Desaulles, A., and Gustafsson, Ö., 2004, Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland, *Chemosphere*, **56**(11), 1061-1076.
- Chagger, H.K., Jones, J.M., Pourkashanian, M., Williams, A., Owen, A., and Fynes, G., 1999, Emission of volatile organic compounds from coal combustion, *Fuel*, **78**(13), 1527-1538.
- Catalo, W.J., 1998, Polycyclic aromatic hydrocarbons in combustion residues from 1,3-butadiene, *Chemosphere*, **37**(1), 143-157.
- Cho, Y.-T. and Park, J.-H., 2013, Influence factor on remediation of PAHs-contaminated soil by using flowing subcritical water, *J. Soil Groundwater Environ.*, **18**(4), 1-7.
- Christie, S., Raper, D., Lee, D.S., Williams, P.I., Rye, L., Blakey, S., Wilson, C.W., Lobo, P., Hagen, D., and Whitefield, P.D., 2012, Polycyclic aromatic hydrocarbon emissions from the combustion of alternative fuels in a gas turbine engine, *Environ. Sci. Technol.*, **46**(11), 6393-6400.
- Guo, H., Lee, S.C., Ho, K.F., Wang, X.M., and Zou, S.C., 2003, Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong, *Atmos. Environ.*, **37**(38), 5307-5317.
- Jiang, Y., Wang, X., Wang, F., Jia, Y., Wu, M., Sheng, G., and Fu, J., 2009, Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China, *Chemosphere*, **75**(8), 1112-1118.
- Khalili, N.R., Scheff, P.A., and Holsen, T.M., 1995, PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline-engines, highway tunnels, and wood combustion emissions, *Atmos. Environ.*, **29**(4), 533-542.

- Li, X., Ma, L., Liu, X., Fu, S., Cheng, H., and Xu, X., 2006, Polycyclic aromatic hydrocarbon in urban soil from Beijing, China, *J. Environ. Sci.*, **18**(5), 944-950.
- MOE (Ministry of Environment), 2012, 2012 Soil survey network and soil pollution investigation.
- MFDS (Ministry of Food and Drug Safety), 2010, Polycyclic aromatic hydrocarbons.
- Nam, J.J., Song, B.H., Eom, K.C., Lee, S.H., and Smith, A., 2003, Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea, *Chemosphere*, **50**(10), 1281-1289.
- Park, S.-H., Lee, W.-B., Kim, J., and Kim, S.W., 2016, Characterization and emission sources of PAHs for industrial complex soils in Jeollanamdo, *J. Soil Groundwater Environ.*, **21**(3), 49-57.
- Peng, C., Chen, W., Liao, X., Wang, M., Ouyang, Z., Jiao, W., and Bai, Y., 2011, Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: Status, sources, distribution and potential risk, *Environ. Pollut.*, **159**(3), 802-808.
- Ray, S., Khillare, P.S., Agarwal, T., and Shridhar, V., 2008, Assessment of PAHs in soil around the international airport in Delhi, India, *J. Hazard. Mater.*, **156**(1-3), 9-16.
- Simcik, M.F., Eisenreich, S.J., and Liroy, P.J., 1999, Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan, *Atmos. Environ.*, **33**(30), 5071-5079.
- Sofowote, U.M., McCarry, B.E., and Marvin, C.H., 2008, Source apportionment of PAH in Hamilton Harbour suspended sediments: comparison of two factor analysis methods, *Environ. Sci. Technol.* **42**(16), 6007-6014.
- US EPA, <https://www.epa.gov/risk/relative-potency-factors-carcinogenic-polycyclic-aromatic-hydrocarbons-pahs> [accessed 16. 11.03].
- Wang, X.-T., Miao, Y., Zhang, Y., Li, Y.-C., Wu, M.-H., and Yu, G., 2013, Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils of the megacity Shanghai: Occurrence, source apportionment and potential human health risk, *Sci. Total Environ.*, **447**, 80-89.
- Wilcke, W., Amelung, W., Krauss, M., Martius, C., Bandeira, A., and Garcia, M., 2003, Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) patterns in climatically different ecological zones of Brazil, *Org. Geochem.*, **34**(10), 1405-1417.
- Xu, J., Guo, J.-Y., Liu, G.-R., Shi, G.-L., Guo, C.-S., Zhang, Y., and Feng, Y.-C., 2014, Historical trends of concentrations, source contributions and toxicities for PAHs in dated sediment cores from five lakes in western China, *Sci. Total Environ.*, **470-471**, 519-526.
- Yang, S.Y.N., Connel, D.W., Hawarker, D.W., and S. I. Kayal, S.I., 1991, Polycyclic aromatic hydrocarbons in air, soil and vegetation in the vicinity of an urban roadway, *Sci. Total Environ.*, **102**, 229-240.
- Yunker, M.B., Macdonald, R.W., Vingarzan, R., Mitchell, R.H., Goyette, D., and Sylvestre, S., 2002, PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition, *Org. Geochem.*, **33**(4), 489-515.
- Zhang, H.B., Luo, Y.M., Wong, M.H., Zhao, Q.G., and Zhang, G.L., 2006, Distributions and concentrations of PAHs in Hong Kong Soils, *Environ. Pollut.*, **141**(1), 107-114.
- Zhang, Y., Guo, C.S., Xu, J., Tian, Y.Z., Shi, G.L., and Feng, Y.C., 2012, Potential source contributions and risk assessment of PAHs in sediments from Taihu Lake, China: comparison of three receptor models, *Water Res.*, **46**(9), 3065-3073.
- Zuo, Q., Duan, Y.H., Yang, Y., Wang, X.J., and Tao, S., 2007, Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in Tianjin, China, *Environ. Pollut.*, **147**(2), 303-310.