광안대교 인근 퇴적토에 포함된 PAHs 농도, 발생원 및 생태학적 위해성 평가

Concentration, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments Obtained from Near Gwangan Bridge

이 태 윤
Taeyoon Lee

부경대학교 환경공학과
Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(Received August 21, 2018; Revised September 21, 2018; Accepted October 10, 2018)

Abstract : The purpose of this study was to determine total concentrations of PAHs in sediments from near Gwangan bridge. The ecological risk assessment and source appointment were performed from constituent of PAHs in sediments. Total concentrations of PAHs for six sites ranged from 592.0 (G4) and 2570.3 ng/g (G2), and no acenaphthylene and acenaphthene were found in six sites. Most of PAHs found in the sediments were two, four, and five ring PAHs, and all PAHs values were below effect range median (ERM) except Dibenzo(a,h)anthracene found at G1 and G2 sites. From ecological risk assessment using mean effects range-median quotient (M-ERM-Q), G3, G4, G5, G6 were classified as low but G1 and G2 were classified as medium-low. The main pollution source of G1 was petroleum, whereas grass, wood, charcoal combustion were the main pollution source for the remaining sites.

Key Words : Sediments, PAHs, Ecological Risk, ERM, M-ERM-Q, Source Appointment

요약 : 본 연구는 광안대교 인근의 퇴적토에 포함된 PAHs의 농도를 측정하고 이를 토대로 이들 PAHs로 인한 생태학적 위해성을 평가하고자 하였다. 또한 PAHs의 여러 성분들의 구성비를 이용하여 PAHs의 오염 원천을 파악하고자 하였다. 6개 지역의 총 PAHs의 농도(ng g^{-1})는 592.0 (G4) - 2570.3 ng/g (G2)이었으며, Acenaphthylene과 Acenaphthene은 6개 지역 모두에서 검출되지 않았다. 검출된 PAHs는 주로 2고리, 4고리, 5고리 형태의 PAHs였으며 대부분의 PAHs 값이 ERM 이하였으나 Dibenzo(a,h)anthracene의 경우 G1과 G2 지역에서 effect range median (ERM) 값을 초과하였다. Mean effects range-median quotient (M-ERM-Q)를 이용한 생태학적 위해성 평가에서는 G1과 G2에서 medium-low, 나머지 지역은 low로 평가되었다. G1 지역의 PAHs의 발생원은 석유오염이었으며, 나머지 지역은 풀, 나무, 석탄연소로 인해 발생한 것으로 평가되었다.

주제어 : 퇴적토, PAHs, 생태학적 위해성, ERM, M-ERM-Q, 발생원

1. 서론

대한민국 남해안 동쪽에 위치한 부산시는 인구 350만의 대도시로 부산의 광안리 및 해운대 해수욕장이 있는 대표적인 휴양도시이다. 도시 내에서 발생하는 대부분의 하폐수는 하수처리시설을 통해 해양으로 방류하지만 비점오염원을 통해 유입되는 오염물질로 인해 광안리 해수욕장 인근 해역의 COD와 SS의 농도가 급격히 높아지는 경우도 있었다.¹⁾ 하천이나 비점오염원을 통해 해양으로 유입된 유기물은 인근 해역의 부영양화를 유발할 수 있으며, 중금속 성분의 경우 생물축적 현상을 통해 그 영향이 장기간 지속될 수 있다.^{2,3)} 우리나라의 연안 퇴적토 관련 연구는 서해와 남해를 중심으로 이루어졌고, 남해의 경우 마산만과 진해만을 중심으로 중금속 오염도 조사가 지속적으로 이루어졌다. 부산 인근 해역, 특히 광안리 주변 해역에 대한 조사는 상대적으로 부족한 편이지만, 수영강 하구에서의 퇴적토 중금속 조사,⁴⁾ 광안리 해수욕장의 비브리오 세균조사,⁵⁾ 그리고 비교적 최근에 조사가 수행된 광안대교 인근 퇴적토의 중금속 오염도 조사⁶⁾ 등이 있다.

대도시화와 이에 수반된 산업화는 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) 물질을 대량 발생시키며 해양과 접한 해도시의 경우 주변 해양에 많은 양의 PAHs 물질을 유출시키는 것으로 보고되었다.⁷⁾ PAHs는 2개 이상의 벤젠 고리를 가지는 방향성 화합물로 낮은 용해도와 높은 octanol/water 분배계수를 가지기 때문에 해수 중으로 유입될 경우에 입자성 물질과 결합하여 최종적으로 퇴적토에 침전이 되는 특징을 가지고 있다.⁸⁾ 퇴적토에 포함된 PAHs로 인한 해양 생태계의 교란과 인간에 미치는 영향에 관한 연구가 최근 지속적으로 보고되고 있다.⁹⁾ 해양 도시 인근 퇴적토에서 발견된 PAHs의 경우에는 대부분이 인간활동으로 인해 유출된 오염물질로 분류가 된다.¹⁰⁻¹²⁾

마산만 퇴적토에 대한 PAHs 측정을 통해 2014년을 기점으로 전 15년간의 농도변화를 보면 증가하지 않고 일정한 수준으로 유지되고 있는데, 이는 마산만으로 유입되는 폐수 대부분을 정화한 후 해양으로 방류하기 때문으로 추측된다.¹³⁾ 울산만 퇴적토의 PAHs 농도는 시화호나 마산만의 PAHs 농도보다 큰 것으로 확인되었는데 이는 울산만에 많은 화학공장과 조선소가 위치하고 있어 이로 인한 오염영향이 큰

것으로 판단되었다.¹⁴⁾

본 연구에서는 광안대교 인근의 퇴적토에 포함된 PAHs 성분을 분석하고 이를 통해 이들 PAHs가 주위 환경에 미칠 수 있는 영향을 평가하고자 하였다. 또한 발생원 추적을 통해 이들 PAHs가 어떤 경로로 이들 지역에 유입이 되었을 지를 밝혀 향후 PAHs 관리에 도움이 되고자 하였다. 최근 환경에 대한 관심이 고조되고 있지만 대부분이공단 근처나 조선소와 같은 산업시설 인근에 대한 조사가 주로 이루어지고 있는 실정에서 본 연구는 광안대교 퇴적토의 PAHs 분석의 첫 사례로 의미가 크다고 판단한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 시료채취 및 장소

부산 광안대교 인근 지역의 퇴적토를 채취하기 위해 부산 P대학교 소속의 해양탐사선을 2017년 9월에 투입하여 총 6개 지점에서 퇴적토를 채취하였다. 6곳의 시료채취 장소는 채취 순서대로 G1에서 G6로 명명하였고 Fig. 1에 표시하였다. 시료채취는 9 L 용량의 Vanveen grab sampler를 이용하였고 시료의 균질성 확보를 위해 각 시료채취 장소를 기준으로 동서남북 30 m에서 4개의 시료를 채취 후 균일하게 혼합하여 균질 시료로 만든 후 분석 전까지 4℃에서 냉장보관하였다.

2.2. 실험방법

퇴적토의 강열감량(ignition loss)은 해양오염공정시험법에 따라 측정되었다. 건조 시료 5 g을 전기로에서 550℃로 2시간 가열하여 강열 전후의 무게차로 시료의 강열감량을 계산하였다. 시료로부터 PAHs를 추출하기 위해 속실렛 추출법을 사용하였다. 습식 시료 10 g을 속실렛 추출장치에 넣은 후 톨루엔을 추출액으로 하여 16시간 동안 추출하였

다. 추출된 용액은 회전증발기(rotary evaporator)에서 80℃, 50 rpm의 속도로 농축되었다. 추출액 전량을 거의 농축한 후 노르말헥산 5 mL를 가하여 용매를 노르말헥산으로 전환하였다. 전환된 시료는 실리카겔이 충전된 유리컬럼에 주입하고 여기에 염화메틸렌과 노르말헥산 용액을 분당 2.5 mL의 유속으로 유출시켜 분석대상물질을 용출시켰다. 시료에 포함된 16개의 PAHs 성분은 GC/MS (Agilent 7890 A GC/5975C MSD)로 분석하였다. 이송기체로는 분당 1 mL의 속도로 헬륨이 사용되었고, 초기 오븐의 온도는 70℃였으며 분당 20℃의 속도로 280℃까지 상승하였다. 사용한 컬럼은 Agilent HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) silica-fused capillary 컬럼이었다. 본 연구에서 분석한 16 PAHs에 대한 자료는 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Description of 16 PAHs

Species	Abbreviations	Number of rings
Naphthalene	Nap	2
Acenaphthylene	Acy	3
Acenaphthene	Ace	3
Fluorene	Flu	3
Phenanthrene	Phe	3
Anthracene	Ant	3
Fluoranthene	Fla	4
Pyrene	Pyr	4
Benzo(a)anthracene	BaA	4
Chrysene	Chr	4
Benzo(b)fluoranthene	BbF	5
Benzo(k)fluoranthene	BkF	5
Benzo(a)pyrene	BaP	5
Dibenzo(a,h)anthracene	Dac	5
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	InP	6
Benzo(g,h,i)perylene	BgP	6

Fig. 1. Sampling locations of sediments obtained from near Gwanggan bridge.

Table 2. Classification of ecological risk of sites based on M-ERM-Q

M-ERM-Q	Ecological Risk
<0.1	Low
0.11 - 0.5	medium-low
0.51 - 1.5	medium-high
>1.51	High priority sites

Table 3. Determination for sources of PAHs using different ratios of PAHs

Calculation	Sources
Ant/(Ant + Phe) < 0.1 and Fla/(Fla + Pyr) < 0.4	Petroleum Pollution
0.1 < Ant/(Ant + Phe) < 0.5 and 0.4 < Fla/(Fla + Pyr) < 0.5	Petroleum Combustion
Ant/(Ant + Phe) > 0.5 and 0.1 < Fla/(Fla + Pyr) < 0.5	Grass, wood, and charcoal combustion
BaA/(BaA + Chr) < 0.2	Petroleum Pollution
BaA/(BaA + Chr) > 0.35	Pyrolytic processes
InP/(InP + BgP) < 0.2	Petroleum Pollution
0.2 < InP/(InP + BgP) < 0.5	Petroleum Combustion
InP/(InP + BgP) > 0.5	Grass, wood, and charcoal combustion

2.3. PAHs에 대한 생태학적 위해성(ecological risk) 평가 방법

해양퇴적토에 포함된 PAHs의 잠재적 생태 위해성은 Mean effects range-median quotient (M-ERM-Q)로 평가할 수 있다.¹⁵⁾ M-ERM-Q는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$M-ERM-Q = \frac{\sum(C_i / ERM_i)}{n} \quad (1)$$

여기서, C_i 는 퇴적토에 포함된 PAH i 의 농도이며, ERM_i 는 PAH i 의 effects range median을 의미한다. n 은 위 계산에 고려된 PAHs의 총 숫자를 뜻한다. 어떤 물질의 농도가 그 물질의 ERM 보다 크다는 것은 그 물질의 위해성이 일반적으로 나타난다는 것을 의미한다. M-ERM-Q의 값에 따른 생태학적 위해성 분류는 Table 2에 요약하였다.

2.4. 발생원 추적 방법

PAHs의 발생원을 알아내기 위해 시료내에 측정된 다양한 종류의 PAHs의 비율을 계산하였다. 다음과 같이 Ant/(Ant + Phe), Fla/(Fla + Pyr), BaA/(BaA + Chr), InP/(InP + BgP)의 값을 계산하였다.¹⁶⁾ 각 계산값을 이용한 PAHs의 발생원 분류 표는 위의 Table 3에 요약하였다.

3. 실험결과 및 해석

3.1. PAHs 총 농도 및 링 숫자에 따른 구성 분석

채취한 시료분석을 통해 구한 16개의 PAHs의 총 농도는 Fig. 2(a)와 Table 4에 나타내었다. Table 4에 표시된 각 물질의 ERL과 ERM 값은 중국 난탕지역 해저퇴적토 연구논문에서 제시한 값을 참조하였다.⁷⁾ 각 시료에 대해 2번씩 분석을 수행하였으며 상대오차는 2% 미만인 것으로 확인되었다. 총 농도는 592.0 - 2570.3 ng g⁻¹ 범위였으며, 6개 지역 평균값은 1213.1 ng g⁻¹이었다. G2 시료에서 가장 높은 값(2570.3 ng g⁻¹)을 나타내었고 다음으로 G1에서 1272.3 ng g⁻¹으로 두 번째로 높은 값을 보였다. 6개 지역의 총 PAHs의 농도는 G2 > G1 > G6 > G5 > G3 > G4의 순으로 감소하였다. G1과 G2 지역의 경우 오염원이 유입되는 것으로 추정되는 수영강과 인접하고 있기 때문에 다른 지점보다 PAHs의 농도가 높은 것으로 판단되며, 중금속의 경우에도 본 연구와 비슷한 오염분포도를 보이고 있다.¹⁾ Acy와 Ace는 6개 시료 모두에서 검출되지 않았고 Bap는 G2 시료에서만 검출되었다. 6개 시료의 개별 PAH의 평균값은 BaP > Dac > Nap > Inp > BgP > BbF > BaA > Chr > BkF > Pyr > Fla > Phe > Ant > Flu > Acy > Ace의 순서로 감소하였다. 각 시료에 포함된 PAHs를 고리 숫자에 따라 분류한 결과를 Fig. 2(b)에 표시하였다.

Fig. 2. Total 16 PAHs concentrations (a) and ratio of ring size for 16 PAHs (b) in the samples.

Table 4. Concentrations of 16 PAHs (ng g⁻¹) in the surface sediments from Gwangalli

PAHs	Abbreviation	Ring	G1	G2	G3	G4	G5	G6	ERL ¹⁾	ERM ²⁾
Naphthalene	Nap	2	111.66	83.99	58.74	72.39	174.05	543.49	160	2100
Acenaphthalene	Acy	3	ND ³⁾	ND	ND	ND	ND	ND	44	640
Acenaphthene	Ace	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	16	500
Fluorene	Flu	3	ND	ND	ND	ND	21.27	6.45	19	540
Phenanthrene	Phe	3	ND	59.71	39.17	18.27	46.07	22.51	240	1500
Anthracene	Ant	3	ND	55.20	34.22	32.74	ND	24.83	85.3	1100
Fluoranthene	Fla	4	ND	148.82	51.69	21.40	42.05	25.68	600	5100
Pyrene	Pyr	4	94.45	152.03	42.24	19.72	38.08	23.98	665	2600
Benzo(a)anthracene	BaA	4	98.23	292.84	63.72	28.01	46.46	33.84	261	1600
Chrysene	Chr	4	78.28	224.89	43.04	24.77	40.78	29.40	384	2800
Benzo(b)fluoranthene	BbF	5	ND	282.29	83.67	43.26	84.41	43.34	320	1880
Benzo(k)fluoranthene	BkF	5	118.83	137.15	43.13	27.25	44.22	25.71	280	1620
Benzo(a)pyrene	BaP	5	ND	337.09	ND	ND	ND	ND	430	1600
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	Inp	6	ND	279.23	121.43	75.13	102.92	65.26	-	-
Dibenzo(a,h)anthracene	Dac	5	532.55	307.83	211.42	170.68	197.47	138.92	63.4	260
Benzo(g,h,i)perylene	BgP	6	238.25	209.24	99.84	58.39	78.67	51.65	430	1600

¹⁾ The 10th percentile of the ranked data is identified as the ERL, and is considered indicative of concentrations below which adverse effects rarely occur

²⁾ The 50th percentile of the ranked data is identified as the ERM, and is indicative of concentrations above which adverse effects frequently occur

³⁾ Non-detectable

Fig. 2(b)를 통해 6개 지역의 시료에 포함된 PAHs는 2고리, 4고리, 5고리 형태의 PAHs가 주 구성 성분인 것을 알 수 있었다. 이는 중국 난탕 하구 해역의 퇴적토 실험결과 중 PAHs 고리 조성비율에 있어 매우 유사함을 알 수 있었다.⁷⁾ G6 시료의 경우 2고리 형태의 PAHs가 52.52%로 가장 많이 포함되어 있으며, 다른 시료의 경우 조성 비율이 20% 미만이었다. 5고리 형태의 PAHs는 51.20% (G1), 41.41% (G2), 37.90% (G3), 40.74% (G4), 35.58% (G5), 21.3% (G6)로 확인되었다. 3고리 형태의 PAHs의 함량은 다른 고리 PAHs에 비해 가장 작았으며, 지역별로는 0.00% (G1), 4.47% (G2), 8.23% (G3), 8.62% (G4), 7.35% (G5), 5.20% (G6)으로 확인되었다. 부산과 인접한 울산항 근처의 해양퇴적토에 포함된 PAHs의 농도는 14 - 7,108 ng g⁻¹으로 지역에 따라 큰 편차를 보이고 있지만,¹⁷⁾ 본 연구결과에 비해 PAHs의 오염도가 큰 것으로 판단된다. 이는 울산지역의 경우 다양한 형태의 산업시설이 울산항 인근에 분포하기 때문에 여기서 유출된 오염물질이 인근 퇴적토에 지속적으로 축적되었기 때문이다. 위의 울산항 연구에서 발견된 PAHs가 주로 4고리와 5고리인 분자량이 큰 물질이었는데, 본 연구에서도 4고리와 5고리의 PAHs가 다수 포함이 된 것을 확인하였다. 다만, 본 연구에서는 2고리의 분자량이 작은 PAHs가 발견되었는데, 특히 G5와 G6 지역의 2고리 PAH 함량이 높은 것으로 나타났다.

Table 4에 각 PAH에 대한 ERL과 ERM 값을 표시하였다. PAH의 농도가 ERL 이하이면 주변 환경에 나쁜 영향을 미칠 가능성이 희박하고 ERM 이상이면 나쁜 영향을 미칠 가능성이 높다는 것을 의미한다. 대부분의 PAH 값이 ERM 이

하였으나, Dac의 경우에는 G1과 G2 지역에서 ERM 값을 초과하였다. G5와 G6 지역의 Nap, G2 지역의 BaA, G3에서 G6 지역의 Dac의 경우에는 ERL과 ERM 기준값의 중간에 위치하였다.

3.2. 생태학적 위해성 평가

각 지역에 대한 M-ERM-Q를 계산하였으며 결과는 Fig. 3에 표시하였다. M-ERM-Q 값이 0.1 이하이면 생태학적 위해성이 낮은 것을 의미하는 데, Fig. 3을 보면 G1과 G2를 제외한 지역은 모두 0.1 이하로 PAHs에 의한 생태학적 위

Fig. 3. Spatial distribution of M-ERM-Q in the surface sediments of Gwangalli.

해석이 낮은 것으로 분류되었다. G1과 G2의 경우에는 M-ERM-Q 값이 0.11 이상이지만 0.5 이하이기 때문에 PAHs로 인한 생태학적 위해성은 medium-low로 평가되었다.

3.3. PAHs의 발생원 추적

6개 시료에 포함된 PAHs의 발생원을 밝히기 위해 Ant/(Ant + Phe), Fla/(Fla + Pyr), BaA/(BaA + Chr), InP/(InP + BgP)의 값을 계산하여 Fig. 4에 표시하였다.⁷⁾ Fig. 4(a)의 결과를 보면 Ant/(Ant + Phe), Fla/(Fla + Pyr)를 이용한 해석은 성공적이지 못한 것을 알 수 있었다. 석유오염(petroleum pollution)에 속하는 곳은 G1이지만 G1의 계산값이 0으로 나와 위의 영역에 속한 것으로 보이고, 석유연소(petroleum

combustion) 영역에는 어떠한 시료도 해당되지 않았다. G4의 경우에는 풀, 나무, 석탄연소(grass, wood, charcoal combustion) 영역에 속하는 것을 알 수 있었다. 나머지 시료의 경우 위 해석방법으로는 발생원을 밝힐 수 없었다. Fig. 4(b)의 경우는 G1 시료를 제외한 나머지 시료 모두 한 영역에 속하는 것을 알 수 있었다. 위 영역은 열분해 영역(pyrolytic process)과 풀, 나무, 석탄연소(grass, wood, charcoal combustion)가 중첩되는 부분으로 PAHs의 발생원을 명확히 확인할 수 있었다. G1의 경우에는 석유의 오염이 PAHs의 발생원으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 광안대교 인근 하부퇴적토에 포함된 PAHs의 농도를 측정하였고 이를 토대로 생태학적 위해성 및 PAHs의 발생원을 파악하고자 하였다. 발생원의 경우 구체적인 발생원을 특정할 수는 없었고 석유유출 혹은 유기물질의 연소와 같은 형식으로 발생원을 구분하여 보았다. 16개의 PAHs에 대해 분석을 하였고 이들 PAHs의 총농도의 경우 592.0 - 2570.3 ng g⁻¹의 값을 보였으며, 인근 울산항 지역의 PAHs의 농도와 비교하였을 때 오염도가 울산항에 비해 덜한 것으로 판단되었다. 6개의 시료 채취장소 중 G2 지역에서 총농도 기준으로 2570.3 ng g⁻¹로 가장 높은 값을 보였는데 이는 이 지역이 오염물질이 유입되는 것으로 추측되는 수영장에 가장 근접한 지역이기 때문으로 판단된다. 생태학적 위해성 평가는 M-ERM-Q를 계산하여 이 값을 기준으로 실시하였다. G1과 G2 지역의 경우 M-ERM-Q 값이 0.11을 초과하여 생태학적 위해성은 medium-low로 평가되었고 나머지 지역은 M-ERM-Q 값이 0.1 이하로 생태학적 위해성은 low로 평가되었다. PAHs의 발생원을 밝히기 위해 다양한 형태의 PAHs의 비율을 계산하였고 이를 토대로 G2 - G6 지역의 PAHs는 풀, 나무, 석탄연소를 통해 생성된 것으로 파악되었으며, G1 지역의 PAHs는 석유가 오염의 원천인 것으로 파악되었다.

Acknowledgement

이 연구는 한국연구재단 지역대학우수과학자(C-D-2018-0411) 지원사업으로 수행된 연구입니다.

KSEE

References

- Choi, E. I., Lee, S. M. and Park, C. K., "The characteristics and the effects of pollutants loadings from nonpoint sources on water quality in suyeong bay," *J. Korean Fish. Soc.*, **28**(3), 279~293(1995).

Fig. 4. Ratios and sources of PAHs in surface sediments from Gwangangan coast, Korea.

2. Chanman, P., Wang, F., Adams, W. and Green, A., "Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids," *Environ. Sci. Technol.*, **33**(2), 3937~3941(1999).
3. Riba, I., Blasco, J. and DelValls, T., "Bioavailability of heavy metals bound to estuarine sediments as a function of pH and salinity values," *Chem. Speciat. Bioavailability*, **15**(3), 101~114(2003).
4. Yang, H. S. and Kim, S. S., "Pollution of heavy metals and sedimentation rate in the sediments of suyeong bay, Pusan," *Bullet. Korean Fish. Soc.*, **27**(5), 643~658(1994).
5. Lee, H. K., "Vibrio tubiashii, Isolated from Kwang-An Beach in Winter Season," *J. Korean Soc. Microbiol.*, **30**(6), 603~609(1995).
6. Kim, S. K., Ahn, J. W., Kang, S. W., Yun, S. L., Lee, J. W., Lee, J. K., Lim, J. H., Kim, D. S. and Lee, T. Y., "Estimation of contamination of sediments at the below of Busan Gwang-an Bridge," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(11), 1~6(2013).
7. Liu, N., Li, X., Zhang, D., Liu, Q., Xiang, L., Liu, K., Yan, D. and Li, Y., "Distribution, sources, and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from the Nantang Coast, China," *Marine Pollut. Bul.*, **114**(7), 571~576(2017).
8. Lindgren, J. F., Hasselov, I. M. and Dahllof, I., "PAH effects on meio-and microbial benthic communities strongly depend on bioavailability," *Aquatic. Toxicol.*, **146**(1), 230~238(2014).
9. Soliman, Y. S., Ansari, E. M. and Wade, T. L., "Concentration, composition and sources of PAHs in the coastal sediments of the exclusive economic zone (EEZ) of Qatar, Arabian Gulf," *Mar. Pollut. Bull.*, **85**(2), 542~548(2014).
10. Lee, C. L., Hsieh, M. T. and Fang, M. D., "Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of Kaohsiung Harbour and Adjacent Coast, Taiwan," *Environ. Monit. Assess.*, **100**(1), 217~234(2005).
11. Wang, Z., Liu, Z., Yang, Y., Li, T. and Liu, M., "Distribution of PAHs in tissues of wetland plants and the surrounding sediments in the Chongming wetland, Shanghai, China," *Chemosphere*, **89**(2), 221~227(2012).
12. Zhang, D., Liu, J., Jiang, X., Cao, K., Yin, P. and Zhang, X., "Distribution, sources and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from the Luan River Estuary, China," *Mar. Pollut. Bull.*, **102**(2), 223~229(2016).
13. Khim, J. S. and Hong, S. J., "Assessment of trace pollutants in Korean coastal sediments using the triad approach: A review," *Sci. Tot. Environ.*, **470**(11), 1450~1462(2014).
14. Choi, H. G., Kim, S. S. and Moon, H. B., "Contamination of tributyltin in sediment from four bays in the southeastern part of Korea," *J. Environ. Sci.*, **12**(5), 881~889(2003).
15. Long, E. R. and MacDonald, D. D., "Recommended used of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems," *Hum. Ecol. Risk Assess.*, **4**(5), 1019~1039(1998).
16. Yunker, M. B., MacDonald, R. W., Vingarzan, R., Mitchell, R. H., Goyette, D. and Sylvestre, S., "PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition," *Org. Geochem.*, **33**(6), 489~515(2002).
17. Yoo, K. S., Jyoung, J. Y. and Jeong, S. Y., "Synchronous determination of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in sediment of Ulsan by synchronous 2nd derivative fluorescence spectrophotometry," *Anal. Sci. Technol.*, **17**(1), 45~52(2004).