Journal of Wetlands Research, Vol. 15, No. 4, pp. 441-451 (2013)

인천연안 갯벌의 다환방향족탄화수소의 농도분포와 발생원 평가

박정환* · 이충대** · 김진한***+

* 인하공업전문대학 화공환경과 교수

** 인천광역시 보건환경연구원

*** 인천대학교 도시환경공학부 교수

Distributions and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Tidal Flat Sediments from Incheon Coastal Area

Jung Hwan Park* · Choong Dae Lee** · Jin Han Kim***+

** Department of Chemical & Environmental Technology, Inha Technical College*

*** Institute of Health & Environment, Incheon Metropolitan City*

**** Department of Environmental Engineering, School of Urban and Environmental Engineering, Incheon National University*

요 약

인천연안 8개 지역 갯벌의 72개 지점의 표층퇴적물과 24개 지점의 주상퇴적물 시료를 2011년 봄·가을 2회에 걸쳐 채취하여, 다환방향족탄화수소(PAHs), 석유계총탄화수소(TPHs) 및 벤젠-톨루엔-에틸벤젠-자일렌(BTEX)의 시·공간적 농도분포 특성을 조사하였다. 또한 PAHs 화합물 구성비에 의한 오염발생기원을 평가하였다. 갯벌 전체의 PAHs 평균농도는 95.62 ㎍/kg으로 조사되었고, 계절별 PAHs 농도분포는 가을철이 봄철보다 낮은 특징을 보였다. 주상퇴적물의 PAHs 농도가 표층퇴적물보다 높았으며, 주상퇴적물의 상부가 하부보다 높은 농도분포를 보였다. 전체 갯벌의 TPHs 평균농도는 46 mg/kg으로 조사되었고, TPHs 평균농도 분포 양상은 봄철보다 가을철이 현저하게 높고, 표층퇴적물이 주상퇴적물보다 높게 나타났다. 갯벌 퇴적물내 PAHs의 오염발생 기원을 평가한 결과, 장화리 갯벌의 표층퇴적물과 소래 및 옥련 갯벌의 주상퇴적물의 PAHs 배출원은 연소와 석유류기원으로 조사되었고, 나머지 모든 갯벌은 연소기원으로 나타났다.

핵심용어 : 주상퇴적물, 인천연안, 다환방향족탄화수소, 발생원, 표층퇴적물, 석유계총탄화수소

Abstract

Samples for estimating concentrations of polycyclic aromatic hydrocargons(PAHs), total petroleum hydrocarbons(TPHs), and benzene-toluene-ethylbenzene-xylene(BTEX) were collected at the tidal flat sediments of 8 coastal sites in Incheon, at seventy-two sampling stations for the surface sediment and twenty-four stations for the sediment core, twice in the spring and fall in 2011. This study was performed to evaluate the distributions of seasonal and spatial concentrations of PAHs, TPHs, and BTEX in the tidal flat sediments. The source origin of PAHs were carried out. The total average concentration of PAHs in the tidal flat sediment was 95.62 ㎍/kg. The characteristic of PAHs concentration distributions was observed that the average concentration in the autumn was lower than that in the spring, and higher concentration in the sediment core than the surface sediment, and greater vertical concentration at the top rather than the bottom in the sediment core. The total average concentration of TPHs at all sampling sites was in the value of 46 mg/kg. The characteristic of the TPHs concentration distribution was observed that the average concentration in the fall was much higher than that in the spring, and higher concentration in the surface sediment than the sediment core. The possible source of PAHs inputs were mainly derived from both pyrogenic and petrogenic origin at the surface sediment at Janghwari site and the sediment cores of both Sorae and Okyeon sites, while the rest sites of study areas originated with pyrogenic combustion.

Keywords *: core sediment, Incheon coast, polycyclic aromatic hydrocarbons, source origin, surface sediment, total petroleum hydrocarbons*

+ Corresponding author : jinhan@incheon.ac.kr

1. 서 론

인천연안은 한강, 임진강, 예성강으로부터 유입되는 다량의 토사와 외해에서 유입되는 퇴적물이 해수의 순환에 의해 연안에 퇴적되는 곳으로 복잡한 리아스시식 해안과 반폐쇄성 해역으로 낮은 수심을 가지고 있어 다양한 저서생물의 서식지가 되고 인근해역에 영양소를 공급하는 해양환경이 잘 발달된 지역이다 (Woo and Je, 2002; MOF, 2003). 인천연안은 송도·청라·영종 경제자유구역 도시개발 및 신항만·공항 건설 등의 지속적인 매립이 최근까지 계속되고 있으며 그에 따른 갯벌 생태계의 환경변화는 매우 장기적으로 지속적이고 완만하게 진행되므로 연안 생태계의 변화 추이 및 피해양상의 심각성이 현저할 것이므로 이에 대한 체계적인 물리·화학적 특성과 관련된 기초자료 조사와 축적은 매우 필수적이다.

산업 및 기술의 발달로 많은 종류의 유기화합물들이 인위적으로 합성 제조되어 환경 중에 배출되어 우리 인간에게 직·간접적으로 영향을 미치고 있다. 이러한 유기화합물들은 다양한 경로를 통해 환경으로 배출되는데 수계로 유입되는 경우 주로 퇴적물에 축적되며 퇴적물은 오염물질의 최종적인 저장소로 간주되고 있다 (Guzzella and Depaolis, 1994; Kang et al., 2010). 특히, 퇴적되는 유기화합물 중에서 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 화합물은 2개 이상의 벤젠고리를 가진 환경내의 주요한 오염물질로써 유기물의 연소나 유류의 사용과정으로부터 갯벌 퇴적토 중에 축적되어 해양환경에 지대한 영향을 줄 수 있다 (Wakeham et al., 1980; Merril and Wade, 1985; McElroy et al., 1989; Park et al., 2009). PAHs는 대규모 산업단지와 인구 밀집지역인 도시지역의 퇴적물에서 높게 나타나는데, 저분자 PAHs는 해양생물에 독성을 나타내고, 고분자 PAHs는 발암성 및 돌연변이성 등의 영향을 미친다 (Shoelhammer, 2002; Jeong et al., 2006). 그동안 연안 및 하구 퇴적물의 PAHs에 대한 다수의 연구들이 여러 나라에서 수행되었다 (Xue et al., 2013; Yim et al., 2007; Venkatesan et al., 2010; Echols et al., 2008; Kucukseagin et al., 2012). 국내에서는 경기만 퇴적물의 PAHs 기원과 분포 특성에 관한 연구 (Kim et al., 1999), 고리원자력 발전소 인근 조간대의 퇴적물의 PAHs 연구 (Noh and Lee, 1999), 시화호 중 PAHs의 농와 분포에 관한 연구 (Kim et al., 2005), 광양만 유역 퇴적물의 PAHs 오염 연구 (Jeong et al., 2004; You et al., 2008), 진해만 하천의 PAHs 유입부하량 및 오염 특성에 관한 연구 (You et al., 2009), 고현만 조선소 주변해역의 퇴적물내 PAHs 분포 특성에 관한 연구 (Park et al., 2009), 낙동강 하천 및 호소 퇴적물내의 PAHs 농도 분포와 발생원 평가에 관한 연구 (Kang et al., 2010), 그리고 태안반도 허베이스피리트호 유류 유출후의 오염지역 퇴적물의 PAHs 오염 및 위해성 평가 (Lee et al., 2010; Jeong et al., 2010) 등이 있다. 이들 연구에서 PAHs의 발생기원을 경기만과 낙동강 유역은 연소기원, 광양만과 고현만 연안은 연소 및 유류기원으로 밝히고 있다. 총석유계 탄화수소(total petroleum hydrocarbons, TPHs)는 석유화합물에 포함된 모든 탄화수소로써 자연계에서 유류오염의 지표로 사용하는데, 퇴적층에서 이에 대한 연구(Lyla et al., 2012; Moreira et al., 2011)는 PAHs에 비해 적은 편이고, 우리나라에서는 연안 갯벌에 대한 TPHs 연구가 수행된 적이 거의 없다. 특히 인천 연안의 갯벌에 대한 연구는 일부 연구자들에 의해 주로 갯벌 퇴적물의 퇴적 특성에 관한 연구 (Woo et al., 2002; Woo et al., 2004; Oh et al., 2006; MOF, 2003; Park et al., 2013a), 저서생물의 생태학에 관한 연구 (Koh et at., 1997; Hong and Seo, 2001; Seo and Hong, 2004; Yang et al., 2005; Cho et al., 2005), 퇴적물의 중금속 분포 특성 연구 (Lee et al., 1998; Park et al., 2013b), 그리고 유기물 분포와 분해에 관한 연구 (An, 2005; Mok et al., 2005; Park et al., 2013a) 등이 수행되었으나 체계적이고 지속적인 연구 자료는 부족한 실정이고 더구나 PAHs에 관한 연구는 전혀 이루어지 않았다.

본 연구는 인천연안 8개 지역을 대상으로 인천연안 갯벌의 해양환경에 대한 모니터링 및 기초자료 제공의 일환으로 갯벌의 표층퇴적물 및 주상퇴적물 중의 다환방향족탄화수소(PAHs), 석유계총탄화수소(TPHs) 및 BTEX (Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)의 시·공간적 농도분포 특성을 분석하였다. 또한 PAHs가 저서생물에 미치는 영향을 검토하고 PAHs의 특정 화합물의 조성비와 오염원 판별지수를 이용하여 오염발생원에 대하여 평가하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 연구대상지역

연구대상지역은 Fig. 1에 나타낸 총 8개 지역으로 인천

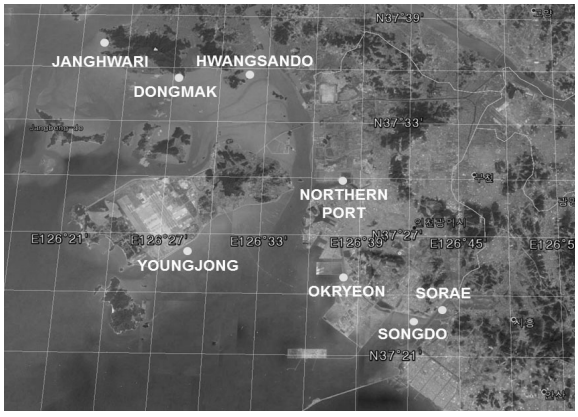

Fig. 1. Map of sampling sites in the tidal flat sediment in Incheon coastal area.

연안 갯벌 중에서 크게 4분류로 나누었다. 한강 등 육상 오염원의 영향을 받는 강화도 남단의 동막, 황산도, 장화리 갯벌과 대규모 매립개발이 진행중인 송도 및 소래포구 갯벌, 공장밀집지역 주변의 북항과 옥련 갯벌, 상대적으로 오염원이 적은 지역인 영종도 갯벌 등 총 8개 갯벌을 선정하였다.

2.2 시료채취방법

연구대상 갯벌의 시료는 대표성을 유지하기 위하여 Fig. 1에 나타낸 갯벌 당 일정간격의 격자망으로 구획된 9개 격자점에서 플라스틱 재질의 주걱으로 교란되지 않은 부분의 표면에서 2cm 깊이까지 표층퇴적물로 지정하여 갯벌 당 9개 지점씩 총 72지점을 채취하였다. 주상퇴적물은 갯벌 당 9개 격자점에 대해 중간에 위치한 수평방향의 3지점에서 지점별로 상(표층~10 cm), 중(20~30 cm), 하(30~50 cm)로 나누어 깊이별로 주상시료채취기(hand corer sampler)를 이용하여 총 24지점을 채취하였다. 시료의 채취는 계절별로 2011년 봄철(3월~4월)과 가을철(9월~10월)에 걸쳐 2회 실시하였고, 채취지점은 휴대용 GPS기를 이용하여 좌표를 조사하였고 각 지점의 경도와 위도를 표1에 나타내었다. 채취한 시료는 폴리에틸렌 팩에 담아 밀폐한 다음 4 ℃ 냉장보관하여 실험실로 옮겨 분석을 실시하였다.

Table 1. Longitude and latitude coordinates of sampling sites

Sampling Sites	Longitude	Latitude
Dongmak	126°27'36.63" ~ 126°27'04.2"	37°35'35.61" ~ 37°35'00.7"
Hwangsan	126°32'36.87" ~ 126°32'20.72"	37°37'01.50" ~ 37°36'51.27"
Janghwa	126°22'30.39" ~ 126°21'49.85"	37°37'19.84" ~ 37°37'09.82"
Yeongjong	126°28'33.03" ~ 126°28'02.89"	37°26'01.58" ~ 37°25'35.70"
Okyeon	126°38'09.54" ~ 126°38'02.30"	37°25'45.77" ~ 37°25'32.75"
Songdo	126°42'41.13" ~ 126°42'14.13"	37°22'57.88" ~ 37°22'23.75"
Northernport	126°38'22.21" ~ 126°37'07.45"	37°29'44.65" ~ 37°29'26.17"
Sorae	126°43'58.10" ~ 126°43'42.09"	37°23'32.71" ~ 37°23'16.74"

2.3 분석방법

시료의 분석항목은 유기물질로 PAHs(다환방향족탄화수소), TPHs(석유계총탄화수소), BTEX(벤젠-톨루엔-에틸벤젠-자일렌)를 분석하였다.

분석에 사용된 모든 초자기구류는 초음파세척기로 세척 후 400 ℃ 오븐에서 4 시간 이상 가열하여 유기물을 완전히 제거하였으며, 사용 전에 다이클로로메테인(dichloromethane, DCM)으로 2회 이상 세척하였다.

PAHs의 분석방법(MLTMA, 2010)은 추출, 정제, 정량의 3단계로 수행하였다. 추출과정은 퇴적물 시료 10 g을 DCM 용매로 가속용매추출장치(ASE-300 및 Büchi speed extractor)로 추출한 다음 질소농축기(Turbovap(II))를 이용하여 1 mL로 농축하였다. 정제는 활성 실리카 500 mg으로 충전된 WATERS사의 카트리지를 사용하여 정제하였다. 정제과정은 DCM 25 mL ; 헥산(hexane) 25 mL의 용액으로 카트리지를 활성화 시키고 농축한 시료 1 mL를 주입하였다. 최종 용출용매는 DCM 5 mL ; 헥산 5 mL를 이용하여 용출용액을 1 mL로 농축한 후 동위원소희석법으로 분석하였다. 정량과정은 시료를 고속용매추출기(ASE, Dionex)로 추출하기 전에 중수소로 치환된 PAHs 16종을 각 0.5 ㎍씩 주입하였다. 분석기기는 GC(Agilent 6890)/MSD(5973N)를 사용하였으며, SIM 모드를 이용하였다.

TPHs의 분석방법(ME, 2009a)은 시료 약 20 g을 고속용매추출기를 이용하여 DCM으로 추출한 후 IPS 여지로 물을 제거하고, 진공농축기(Büchi)로 2 mL로 농축하였다. 유기물을 제거하기 위해 농축액에 실리카겔 0.3 g을 넣고 30 초간 진탕하여 5 분간 정치시킨 후 상등액을 시료로 하여 GC(Agilent 6890N)로 정량하였다.

BTEX 분석방법(ME, 2009b)은 시료 1 g을 10 mL 메탄올에 넣어 초음파세척기(Bandelin, HD-2200)로 30 분간 추출한 후 Purge & Trap을 이용하여 GC(Agilent 6890N)/MSD(5973N)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 갯벌 퇴적물의 PAHs 농도 분포

연구대상 갯벌의 PAHs 농도분포를 Fig. 2 ~ 4에 나타내었다. Fig. 2를 살펴보면, 갯벌의 계절별 PAHs 농도의 최소값과 최대값 범위는 봄철 70.90 ~ 265.74 ㎍/kg (평균 105.59 ㎍/kg)이고, 가을철 48.34 ~ 256.21 ㎍/kg (평균 85.65 ㎍/kg)이며 갯벌 전체 평균 농도는 95.62 ㎍/kg

로 조사되었다. 황산도가 62.34 ㎍/kg으로 가장 낮은 평균 PAHs 농도를 보였으며 북항이 260.97 ㎍/kg으로 가장 높은 결과를 보였다. 북항의 농도가 상대적으로 높은 주된 원인은 주변에 정유공장, 소각시설 등 각종 산업시설이 위치하고 있으며, 항구에 접안하는 선박과 대형 화물자동차들의 빈번한 통행 등의 오염원이 많고, 내항으로서 조류에 의한 오염물질의 희석이 빈약하여 화합물이 외해로 유출이 되지 못하고 축적되기 때문인 것으로 판단된다. 북항의 조사 결과값은 Kim et al.(1999)의 PAHs 조사 결과인 인천항 260 ㎍/kg과 아주 유사한 결과를 보였다. 북항을 제외한 나머지 7개 지역 갯벌의 PAHs 농도범위는 62.34 ~ 79.00 ㎍/kg으로 평균값은 71.99 ㎍/kg으로 조사되었는데, 이는 Kim et al.(1999)이 조사한 한강 하구의 83 ㎍/kg 보다는 약간 낮은 결과값을 보였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 모든 지역에서 봄철보다는 가을철의 PAHs 농도가 낮게 나타났는데, 이는 갯벌에서 서식하는 모든 생물 개체군이 봄보다는 여름을 거쳐 가을에 개체수가 많아지고 각 개체들이 가을철에 성체가 되고 이들이 활발한 섭생으로 갯벌 퇴적물 내에 존재하는 다환방향족탄화수소류 등 유기 오염물질들의 정화가 활발하게 이루어졌기 때문으로 추측된다.

Fig. 3을 살펴보면, 갯벌 퇴적물의 지점별 PAHs 농도 범위는 표층퇴적물이 44.64 ~ 255.09 ㎍/kg으로 평균 80.58 ㎍/kg이고, 주상퇴적물은 80.05 ~ 266.86 ㎍/kg으로 평균값은 110.66 ㎍/kg이며, 표층과 주상퇴적물 갯벌의 전체 평균은 95.62 ㎍/kg으로 조사되었다. 인천연안 갯벌의 표층퇴적물 PAHs 평균값은 광양만 해역의 표층퇴적물 평균농도인 127.42 ㎍/kg (Cho et al., 2007) 보다 다소 낮은 값을 보였고, 낙동강 하천 퇴적물의 평균농도인 210.6 ㎍/kg (Kang et al., 2010)의 약 절반 정도의 농도를 나타냈으며, 고현만내 퇴적물의 평균 농도인 346 ㎍/kg (Park et al., 2009) 보다는 약 1/4 정도의 낮은 값을 보였다. 또한 연구지역내 갯벌의 주상퇴적물의 PAHs 농도는 광양만 유역 주상퇴적물의 평균농도인 406.43 ㎍/kg (You et al., 2008)의 약 1/4로 나타났다. 인천연안 갯벌의 주상퇴적물의 PAHs 평균농도의 최소값은 황산도에서 80.05 ㎍/kg (60.8 ~ 95.01 ㎍/kg)이고 최대값은 북항 주상퇴적물에서 266.86 ㎍/kg (129.52 ~ 464.62 ㎍/kg)이었다. 그러나 북항 갯벌의 주상퇴적물에서 보인 PAHs 최대 농도인 464.62 ㎍/kg은 주변의 정유공장 등에 기인하는 것으로 판단되나 광양만 주변해역의 주상퇴적물 최대 농도인 2,838.64 ㎍/kg (You et al., 2009) 보다는 훨씬 밑도는 수치를 보이고 있음을 알 수 있다. 광양만 해역 퇴적물의 높은 PAHs 농도는 주변의 여수 석유화학산업단지에서 유입되는 석유류 때문으로 판단된다.

Fig. 3에서 보듯이 조사지역 모두 주상퇴적물의 PAHs가 표층퇴적물보다 높은 농도를 보이고 있고, Fig. 4를 살펴보면, 주상퇴적물의 상부가 하부보다 대체적으로 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 이것은 PAHs 화합물이 소수성이고 부유입자에 잘 흡착되는 특성으로 갯벌 퇴적물에 장기간 축적되기 때문으로 판단된다. 따라서 갯벌은 PAHs 화합물의 저장소로서의 역할을 하고 있음을 보여주고 있다.

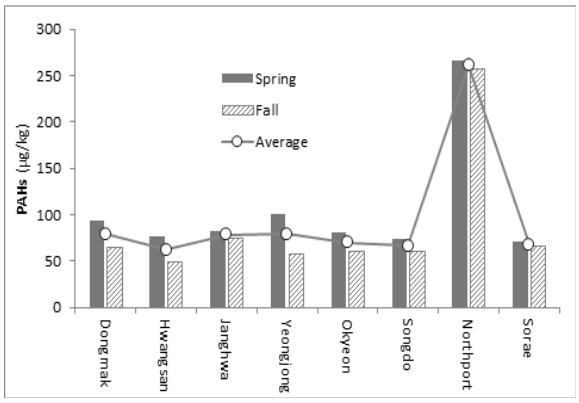

Fig. 2. Seasonal distribution of PAHs concentration in the tidal sediment in the study area.

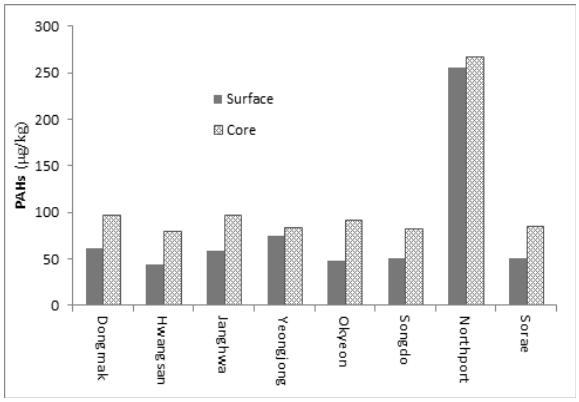

Fig. 3. Distribution of PAHs concentration in the tidal flat sediment in the study area.

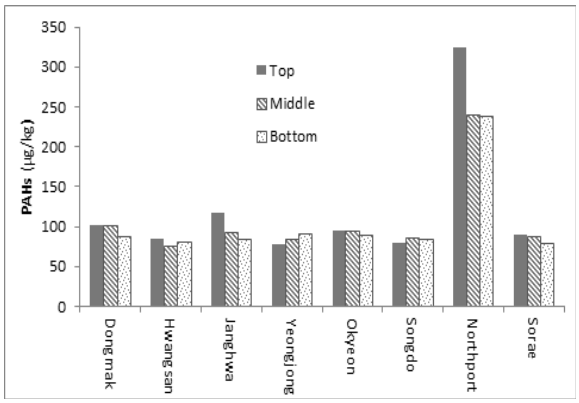

Fig. 4. Distribution of PAHs concentration in the core sediment in the study area.

3.2 갯벌 퇴적물의 유류(TPH, BTEX) 농도 분포

인천연안 갯벌의 석유계총탄화수소 TPHs의 농도분포를 Fig. 5 ~ 6에 나타내었다. TPHs의 계절별 농도범위는 봄철에 12 ~ 54 mg/kg이고 평균값은 28 mg/kg, 가을철에는 29 ~ 170 mg/kg으로 평균 65 mg/kg을 가지며 갯벌 전체 평균 농도는 46 mg/kg이다. 봄철 옥련 갯벌의 TPHs가 21 mg/kg으로 가장 낮은 결과를 보였고, 가을철의 북항 갯벌이 112 mg/kg으로 가장 높은 농도를 보였다. 북항에서 상대적으로 높은 농도를 보이는 것은 PAHs의 경우와 유사한 것이다. Fig. 5에서 보듯이 대부분의 갯벌에서 봄철보다 가을철에 TPHs가 현저하게 높게 조사되었는데, 이는 시료 채취 시의 수온이 가을철이 봄철보다 높아 갯벌 퇴적물내에서의 확산이 상대적으로 활발하기 때문으로 판단된다. 갯벌 퇴적물의 지점별 TPHs 농도범위(Fig. 6)는 표층퇴적물이 25 ~ 130 mg/kg으로 평균 55 mg/kg이고, 주상퇴적물이 17 ~ 94 mg/kg이고 평균 38 mg/kg이다. 옥련 갯벌의 유류 오염도가 상대적으로 가장 낮고 북항 갯벌의 오염도가 가장 높았다. 표층퇴적물의 TPHs 평균농도가 주상퇴적물보다 약 45% 정도 높은 것으로 조사되었는데, 유류는 해수에 의한 확산과 증발 및 조류운동에 의한 물리적 작용으로 제거되고, 비중이 1.0보다 큰 일부만이 퇴적물 표층에 흡착·침강하고 흡착·침강된 유류는 어패류 등에 의해 분해되고, 그 나머지가 주상퇴적물에 침전되기 때문으로 판단된다. PAHs와 TPHs의 계절별·공간적 농도 분포 특징은 서로 반대 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 연구지역 내 퇴적물의 TPHs 평균농도는 토양환경보전법 시행규칙에 규정된 토양오염우려기준(염전: 2지역) 800 mg/kg의 5.7 % 수준이고, 최대값을 보인 북항 갯벌도 기준값의 14 %에 불과하다. 그리고 인천광역시 토양오염실태조사 결과(IIHE, 2011)인 84 mg/kg과 비교하여도 낮은 결과를 보여 유류에 의한 오염은 미약한 것으로 사료된다.

톨루엔(toluene)을 제외한 BEX(benzene, ethylbenzene, xylene)는 봄철 및 가을철의 전체 조사지역에서 불검출되었으며, 톨루엔만이 옥련 갯벌의 가을철 조사에서 불검출 ~ 1.947㎎/㎏ (평균 0.198 ㎎/㎏)으로 조사되었는데, 이는 부근에 자동차 정비단지가 소재하고 있어 자동차의 도색에 사용되는 시너(thinner)와 엔진에 사용되는 유류에 기인하여 갯벌을 오염시킨 것으로 예상되며, 옥련 갯벌을 제외한 나머지 7개 지역은 모두 불검출로 석유류에 의한 오염은 없는 것으로 조사되었다. 이는 휘발유는 상온에서 매우 잘 휘발되는 특성 때문인 것으로 추측된다.

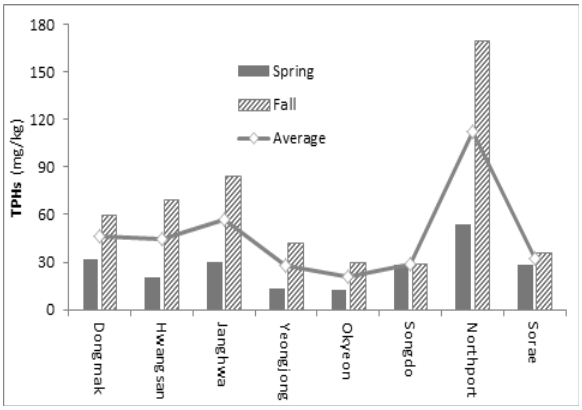

Fig. 5. Seasonal distribution of TPHs concentration in the tidal flat sediment in the study area.

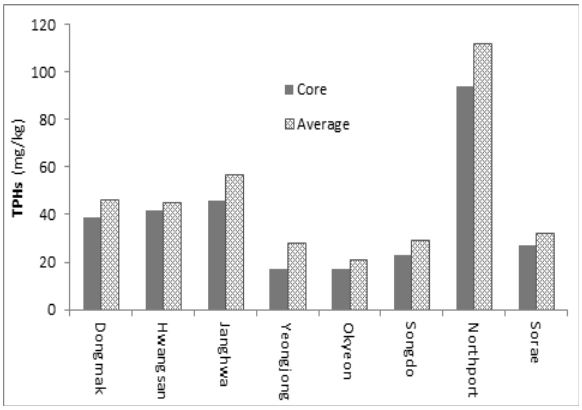

Fig. 6. Distribution of TPHs concentration in the surface and core sediment in the study area.

3.3 PAHs가 저서생물에 미치는 영향

퇴적물의 PAHs 농도범위는 최소값이 황산도 갯벌의 표층퇴적물에서 17.22 ㎍/kg, 최대값이 북항 갯벌의 주상퇴적물에서 464.62 ㎍/kg으로 나타났다(Fig. 7). 전체 갯벌 퇴적물의 평균값은 황산도 갯벌 62.34 ㎍/kg(17.22 ~ 95.01 ㎍/kg)으로 최소, 북항 갯벌 260.97 ㎍/kg(129.52 ~464.62 ㎍/kg)으로 최대치로 조사되었고, 인천연안 8개 지역의 전체 평균은 95.62 ㎍/kg으로 나타났다. 미국 국립해양대기청(NOAA, 1991)은 퇴적물 중에 PAHs 오염으로 인한 생물학적 영향에 대한 기준으로 ERL(Effect Range-Low), ERM(Effect Range-Median) 농도를 제시하였다. ERL 기준을 초과하지 않은 퇴적물은 생물학적 영향의 잠재력이 거의 없고, ERM 기준을 초과하는 것은 생물학적 영향의 잠재력이 높은 것으로 간주되며, ERL 기준을 초과하나 ERM 보다 낮은 것은 상대적으로 낮은 정도의 생물학적 영향이 있는 것으로 판단한다. 생물학적 영향에 대한 ERL 및 ERM의 NOAA 농도 기준과 갯벌 퇴적물에서 분석된 PAHs 화합물과 비교하면 ERL 기준값인 4,020 ㎍/kg에 비하여 훨씬 낮은 농도를 보여 생물성장에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 그러나 북항은 플루오렌(fluorene)이 평균 11.19 ㎍/kg

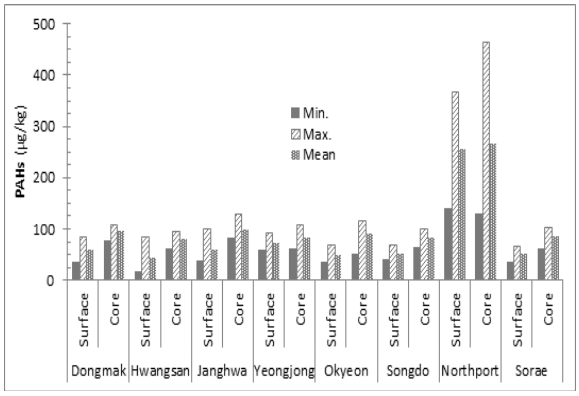

Fig. 7. Minimum, maximum, and mean values of PAHs in the tidal flat sediment in the study area.

(2.89 ~ 30.25 μg/kg)으로 조사되었고, 표층퇴적물 9개 지점 중 2개 지점에서 NOAA 권고기준인 19 μg/kg을 초과하는 것으로 조사되어 북항은 생물에 어느 정도 악영향을 미치고 있는 것으로 조사되었다.

갯벌 퇴적물에 대한 벤조(a)피렌을 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. 옥련 갯벌이 평균 농도 0.31 μg/kg으로 최소값을 나타냈고, 북항 갯벌이 10.84 μg/kg으로 최대값을 가지며 전체 평균농도는 2.45 μg/kg으로 조사되었다. 조사 결과를 NOAA 권고기준과 비교하면, 모든 갯벌의 벤조(a)피렌 화합물 평균값이 모두 ERL 430 μg/kg에 훨씬 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 토양오염우려기준 700 μg/kg(1지역)과 비교하여도 매우 낮은 결과를 보여 발암성 물질인 벤조(a)피렌에 의한 생물 성장의 악영향은 없는 것으로 판단된다.

Table 2. Distribution of benzo(a)pyrene concentration in the tidal flat sediment in the study area. (unit;μg/kg)

Items	Dongmak	Hwangsan	Janghwa	Yeongjong	Okyeon	Songdo	Northport	Sorae	Total average
Spring	0.24	0.33	0.00	0.00	0.00	1.04	1.99	1.27	0.61
Fall	1.67	4.49	1.49	4.02	0.61	1.99	19.68	0.42	4.30
Surface	0.24	2.90	0.00	2.14	0.11	1.71	8.13	0.74	2.00
Core	1.67	1.92	1.49	1.88	0.50	1.31	13.54	0.95	2.91
Average	0.96	2.41	0.75	2.01	0.31	1.51	10.84	0.84	2.45

3.4 PAHs의 분포 및 오염발생원

인천연안 갯벌 퇴적물에 존재하는 16가지 PAHs의 평균 농도 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 갯벌 퇴적물에 존재하는 전체평균 PAHs 중 fluoranthene이 28.1 %로 가장 우세하였고 pyrene 12.2 %, indeno[1,2,3-c,d]pyrene 10.0 %, benzo[b+k]fluoranthene 9.9 %를 차지하여 이들이 60.2 %를 차지하여 고분자량 화합물이 주를 이루는 것으로 조사되었다. 16개 항목별 조사결과는 플루오르란텐이 평균

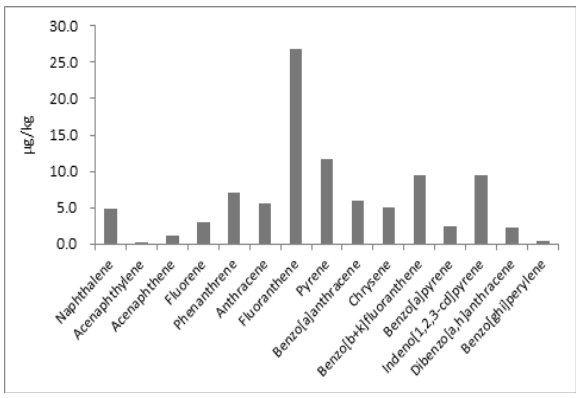

Fig. 8. Distribution patterns of PAHs in the tidal flat sediment in the study area.

26.86 μg/kg(불검출 ~ 148.97 μg/kg)으로 최고값을 보였고, 아세나프탈렌이 0.23 μg/kg(불검출 ~ 3.71 μg/kg)으로 최소값을 나타났다.

해양 환경에서 PAHs 화합물 구성비에 의한 오염발생원을 조사하는 방법으로 PAHs 화합물 중의 phenanthrene (Ph)과 anthracene(An) 조성비 Ph/An 및 fluoranthene(Fl)과 pyrene(Py) 조성비 Fl/Py로 오염발생원을 추정하는데 폭넓게 사용되었다 (Baumard et al., 1999; Jeong et al., 2004; You et al., 2008; Park et al., 2009; Kang et al., 2010; Lee et al., 2010). 일반적으로 Ph/An < 10이고 Fl/Py > 1이면 연소에 의한 기원으로, 그 반대면 유류오염에 의한 기원으로 분류하였다.

인천연안 갯벌내의 표층퇴적물과 주상퇴적물에 대하여 Ph/An 대 Fl/Py 비의 분포 패턴을 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Ph/An와 Fl/Py의 비가 각각 0.09 ~ 11.08, 0.95 ~ 46.28로 나타났다. 장화리 갯벌의 표층퇴적물, 소래 및 옥련 갯벌의 주상퇴적물의 배출원은 연소와 유류누출의 2가지 복합적인 오염원으로 조사되었으며, 나머지 갯벌은 모두 연소에 의한 원인으로 조사되었다. 연소와 유류에 의한 복합적인 오염원인인 옥련 갯벌은 주변에 산재한 자동차 정비단지의 영향으로 판단되며, 소래와 장화리 갯벌은 어선의 빈번한 왕래에 따른 선박

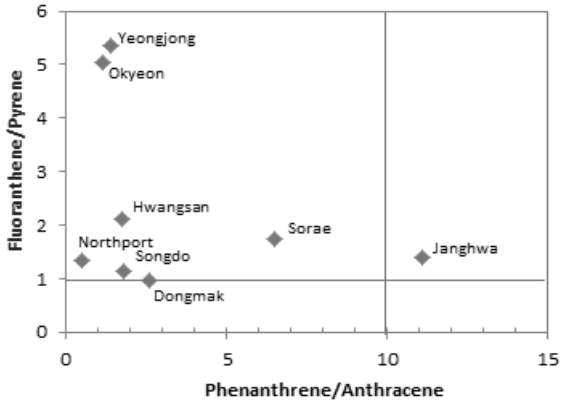

Fig. 9. Cross plot of PAHs for the ratio of phenanthrene/anthracene vs. fluoranthene/pyrene in the surface sediment in the study area.

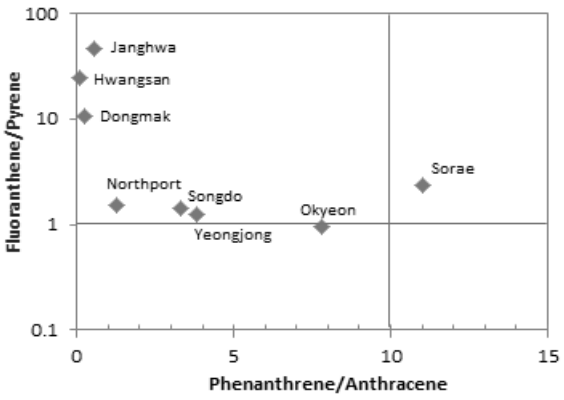

Fig. 10. Cross plot of PAHs for the ratio of phenanthrene/anthracene vs. fluoranthene/pyrene in the sediment core in the study area.

에서 유출되는 유류에 의하여 장기간 갯벌 퇴적물에 영향을 미친 것으로 판단된다. 연소기원으로 조사된 나머지 5개 갯벌은 인천이 많은 자동차의 통행과 산업단지가 산재하고 있는 현대화된 도시로 오염원이 많기 때문으로 사료된다.

Yunker et al.(2002)과 Magi et al.(2002)은 PAHs 화합물 중에서 fluoranthene과 pyrene의 조성비로 오염발생원을 추정하였는데, Fl/(Fl+Py)비가 0.4 이하이면 유류기원, 04 ~ 0.5이면 석유연소기원, 0.5를 초과하면 연소기원으로 각각 분류하였다. 이 방법으로 조사한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 모든 갯벌에서 비율이 0.5 이상으로 모두 연소에 의한 오염으로 조사되었다.

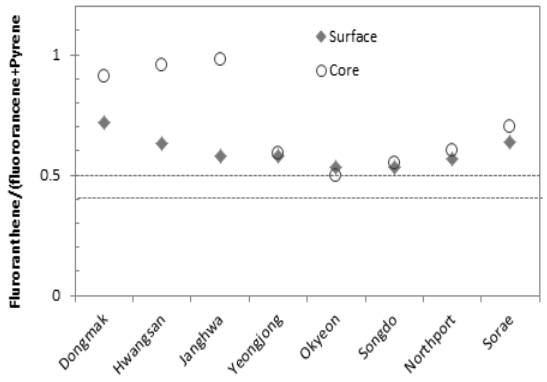

Fig. 11. Distribution of PAHs for the ratio of fluoranthene/(fluoranthene+pyrene) at each sampling site.

Soclo et al.(2006)은 저분자량 PAHs인 naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene, fluorene, phenanthrene, antheracene의 전체 농도를 LMW로 놓고, 고분자량 PAHs인 fluoranthene, benzo[a]anthracene, pyrene, chrysene, benzo[b+k]fluoranthene, benzo[a]pyrene, dibenzo[a,h]anthracene, benzo[g,h,i]perylene, indeno[1,2,3-c,d]pyrene의 전체 농도를 HMW로 놓고 LMW/HMW 조성비로 오염발생원을 추정하였는데, 그 비가 1 미만이면 연소에 의한 기원, 1 이상이면 유류에 의한 기원으로 분류하였다. 이 방법으로 조사한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 조사지역 모두 연소에 의한 오염발생원으로 평가되었다.

인천연안 갯벌의 표층퇴적물은 모두 PAHs가 연소기원으로 조사되었고, 극히 일부 주상퇴적물이 연소 및 유류기원으로 나타났으나 전체적으로는 볼 때 연소에 의해 PAHs의 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

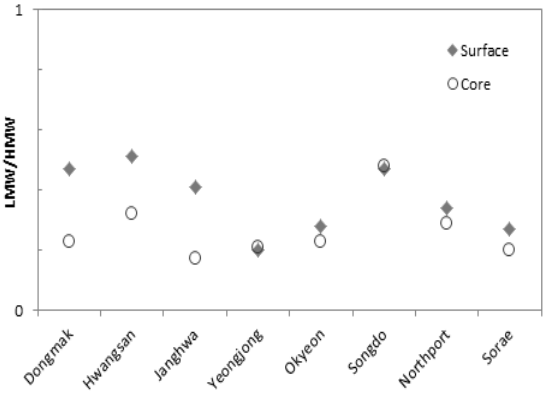

Fig. 12. Distribution of the ratio of (LMW PAHs)/(HMW PAHs) at each site.

4. 결 론

인천연안 8개 지점의 갯벌을 대상으로 2011년 봄철(3월 ~ 4월)과 가을철(9월 ~ 10월) 2회에 걸쳐 퇴적물의 PAHs, TPHs 및 BTEX 농도분포 특성과 PAHs의 오염발생원에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 인천연안 갯벌의 계절별 PAHs 농도범위는 봄철 70.90 ~ 265.74 ㎍/kg (평균 105. ㎍/kg)이고, 가을철 48.34 ~ 256.21 ㎍/kg (평균 85.65 ㎍/kg)이며 갯벌 전체 평균농도는 95.62 ㎍/kg으로 조사되어

봄철보다는 가을철의 PAHs 농도가 낮게 나타나는 것으로 조사되었다.

2) 표층퇴적물의 PAHs 농도범위는 44.64 ~ 255.09 ㎍/kg (평균 80.58 ㎍/kg)이고, 주상퇴적물은 80.05 ~ 266.86 ㎍/kg (평균 110.66 ㎍/kg)으로 조사되었고, 주상퇴적물의 PAHs 농도가 표층퇴적물보다 높은 농도를 보이는 것으로 나타났다. 연구지역의 PAHs 농도는 광양만, 고현만, 낙동강 하구의 퇴적물보다 훨씬 낮은 농도 수준을 보이는 것으로 나타났다. 주상퇴적물에서는 상부가 하부보다 높은 농도분포를 보였다.
3) TPHs의 계절별 농도범위는 봄철 12 ~ 54 mg/kg (평균 28 mg/kg)이고, 가을철 29 ~ 170 mg/kg (평균 65 mg/kg)이며 전체 평균농도는 46 mg/kg으로 나타났으며, 봄철보다 가을철의 TPHs 농도가 현저하게 높게 조사되었다. PAHs와 TPHs의 계절적·공간적 농도분포 특징은 서로 반대의 경향을 보이는 것으로 나타났다.
4) 표층퇴적물의 TPHs 농도범위는 25 ~ 130 mg/kg (평균 55 mg/kg)이고, 주상퇴적물은 17 ~ 94 mg/kg (평균 38 mg/kg)으로 조사되었고, 표층퇴적물의 TPHs 평균농도가 주상퇴적물보다 높은 것으로 나타났다. 연구지역내 퇴적물의 TPHs 평균농도는 토양오염우려기준(염전: 2지역)의 5.7% 수준에 불과하고, 2011년에 실시한 인천광역시 토양오염 실태 조사결과인 84 mg/kg보다 훨씬 낮은 값을 보여 유류에 의한 갯벌 오염은 거의 없는 것으로 판단된다.
5) 톨루엔을 제외한 BEX는 봄·가을철 조사에서 검출되지 않았으며, 톨루엔은 가을철 옥련 갯벌에서 평균 0.198 mg/kg으로 검출되었다. 자동차 정비단지가 산재되어 있는 옥련 갯벌을 제외한 나머지 7개 조사지역 갯벌은 석유류에 의한 오염은 없는 것으로 조사되었다.
6) 인천연안 갯벌의 PAHs 농도는 일부 정점에서 기준치를 초과하였으나, 평균 농도는 미국 국립해양대기청(NOAA)의 생물학적 오염 영향 기준인 ERL 기준값에 훨씬 못 미치는 것으로 조사되었으며 총괄적으로 볼 때 PAHs에 의한 갯벌 생물성장에 별다른 영향은 없는 것으로 조사되었다.
7) 북항 갯벌은 PAHs 중 fluorene이 2.89 ~ 30.35 ㎍/kg으로서 표층퇴적물 9개 중 2개 지점에서 NOAA 권고기준보다 높게 조사되어 생물성장에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 또한 benzo(a)pyrene은 0.31 ~ 10.84 ㎍/kg (평균 2.45 ㎍/kg)으로 나타났으며 NOAA 권고기준인 ERL보다 훨씬 낮은 것으로 나타나 발암성 물질인 벤조(a)피렌에 의한 생물성장의 악영향은 없는 것으로 판단된다.
8) 퇴적물에 존재하는 16가지 PAHs 중 fluoranthene이 가장 우세하였고, pyrene, indeno[1,2,3 -c,d]pyrene, benzo[b+k]fluoranthene 순으로 우세하였으며 이들 고분자량 화합물이 약 60 %를 차지하는 것으로 나타났다.
9) 퇴적물의 Ph/An, Fl/Py의 비가 각각 0.09 ~ 11.08, 0.95 ~ 46.28로 산출되었으며, 장화리 갯벌의 표층퇴적물과 소래 및 옥련 갯벌의 주상퇴적물의 PAHs 배출원은 연소와 석유류에 의한 오염으로 조사되었으며, 나머지 갯벌은 모두 연소에 의한 기원으로 조사되었다.
10) Fl/(Fl+Ph)비와 저분자량 PAHs/고분자량 PAHs의 비에 의한 오염발생원 평가에서 모든 갯벌은 연소에 의한 기원으로 조사되었다.

감사의 글

본 연구는 인천광역시 보건환경연구원의 협력으로 수행되었으며 연구에 도움을 주신 연구원들께 감사드립니다.

Reference

An, SM (2005). Seasonal variations of sediment oxygen demand and denitrification in Kanghwa tidal flat sediments, *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 10(1), pp. 47-55. [Korean Literature]

Baumard, P, Budzinsk, H, Garrigues, P, Dizer, H and Hensen, PD (1999). Polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments and mussels (*Mytilus edulis*) from the Western Baltic Sea; Occurrence, bioavailability and seasonal variations, *Marin Environmental Research*, 47(1), pp. 17-47.

Cho, BC, Choi, JK, Lee, TS, An, S and Hyun, JH (2005). Biogeochemical studies on tidal flats in the Kyunggi bay: Introduction, *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 10(1), pp. 1-7. [Korean Literature]

Cho, CR, Park, JC, You, YS and Cho, HS (2007). Heavy metals and PAHs in sediment of Gwangyang Bay, *Proceedings of Conference on the Korean Society of Marine Environment & Safety, Fall 2007*, pp. 83-86. [Korean Literature]

Echols, KR, Brumbaugh, WG and Orazio, E (2008). Distribution of pesticides, PAHs, PCBs, and bioavailable metals in depositional sediments of the lower Missouri River, USA, *Archives of Environmental Contamination*

and Toxicology, 55(2), pp. 161-172.

Guzzella, L and Depalolis, A (1994). Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Adriatic sea, *Marine Pollution Bulletin*, 28, pp. 159-165.

Hong, HS and Seo, IS (2001). The community ecology of benthic macrofauna on the Cheokjeon tidal flat, Incheon, Korea 1. community structure, *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 6(3), pp. 190-200. [Korean Literature]

Incheon Institute of Health and Environment (IIHE) (2008). *Study on the PAHs Contamination Level for the Roadside Sediment in Incheon Metropolitan City*, Technical Report Incheon Institute of Health and Environment. [Korean Literature]

Jeong, HH, Jeong, HS, Kim, EY, Jo, HI, Hwang, JC and Choe, SW (2004). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the sediments of Kwangyang bay on Korea, *Journal of the Environmental Sciences*, 13(6), pp. 543-549. [Korean Literature]

Jeong, HH, Park, EH and Choi, SW (2006). Compositional characteristics and origin of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons[PAHs] of crude oils and petroleum products, *Journal of the Environmental Sciences*, 15(5), pp. 397-403. [Korean Literature]

Jeong, JY, Choi, CW, Ryeom, TK, Cho, KH, Park, SR, Shin, HS, Lee KH and Lee HM (2010). Analysis and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seafood from oil contaminated bay, *Analytical Science and Technology*, 23(2), pp. 187-195. [Korean Literature]

Kang, HY, Lee, IS, Huh, IA, Shin, WS, Hwang, IS, Kim, YH, Hur, J, Shin, HS, Kim, JH and Oh (2010). Assessment of distribution patterns and sources for PAHs, OCPs, and Co-PCBs in the surface sediments from the Nakdong river basin, Korea, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(7), pp. 656-664. [Korean Literature]

Kim, GB, Maruya, KA and Lee, RF (1999). Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Kyeonggi Bay, *Marine Pollution Bulletin*, 38(1), pp. 7-15.

Kim, JG, Kim, HS, Kim, KS and Lee, DS (2005). Concentration and partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in the lake of Sihwa, Korea, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 27(7), pp. 690-696. [Korean Literature]

Koh, BS, Lee, JH and Hong, JS (1997). Distribution patterns of the benthic macrofaunal community in the coastal area of Inchon, Korea, *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 2(1), pp. 31-41. [Korean Literature]

Kucuksezgin, F, Pazi, I and Gonul, LT (2012). Marine organic pollutants of the Eastern Aegean; Aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in Candarli Gulf surficial sediments, *Marine Pollution Bulletin*, 64(11), pp. 2569-2575.

Lee, JH, Yi, JS, Kim, BS, Lee, CB and Koh, CH (1998). Characteristics of metal distribution in the sediment in Kyeonggi bay, Korea, *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 3(3), pp. 103-111. [Korean Literature]

Lee, WS, Park, SY, Kim, PJ, Jeon, SB, An, KH, ChoiI, YS (2010). Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in seawater and marine sediments from anmyundo coastal area after oil spill, *Journal of the Environmental Sciences*, 19(12), pp. 1421-1430. [Korean Literature]

Li, G, Xia, X, Yang, Z, Wang, R and Voulvoulis, N (2006). Distribution ans sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the middle and lower reaches of the Yellow river, China, *Environmental Pollution,* 144, pp. 985-993.

Lyla, S, Manokaran, S and Khan (2012). A, Petroleum hydrocarbon distribution in continental shelf region of southeast coast of India, *International Journal of Sediment Research*, 27(1), pp. 73-83.

Magi, E, Bianco, R, Innai, R and Di Carro, M (2002). Distribution of polycyclic hydrocarbons in the sediments of the Adriatic Sea, *Environmental Pollution*, 119(1), pp. 91-98.

McElroy, AE, Farrington, JW and Teal, JM (1989). *Bioavailability of PAH in the Aromatic Environment. In; Varanasi, U (ed.), Metabolism of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Aquatic Environment*, CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 1-39.

Merrill, EG and Wade, TL (1985). Carbonized coal products as a source of aromatic hydrocarbons to sediments from a highly industrialized estuary, *Environmental Science and Technology*, 19(7), pp. 597-603.

Ministry of Environment (ME) (2009a). *Standard Methods for the Examination of Soil Pollution*, ES 07552, pp. 173-175, Ministry of Environment. [Korean Literature]

Ministry of Environment (ME) (2009b). *Standard Methods for the Examination of Soil Pollution*, ES 07601, pp. 230-238, Ministry of Environment. [Korean Literature]

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA) (2010). *Standard Methods for the Testing of Maritime Environment*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. pp. 256-261. [Korean Literature]

Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2003). *Studies on the Pollution of Tidal Flat Sediments in Kyunggi and Incheon Areas*, Technical Report, Ministry of Oceans and Fisheries. [Korean Literature]

Mok, JS, Cho, HY, and Hyun, JH (2005). Rates of anaerobic carbon mineralization and sulfate reduction in association with bioturbation in the intertidal mudflat of Ganghwa, Korea, *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 10(1), pp. 38-46. [Korean Literature]

Moreira, ITA, Oliveira, OMC, Triguis, JA, dos Santos, AMP, Queiroz, AFS, Martins, CMS, Silva, CS and Jesus, RS (2011). Phytoremediation using *Rizophora mangle L.* in mangrove sediments contaminated by persistent total petroleum hydrocarbons (TPH's), M*icrochemical Journal*, 99(2), pp. 376-382.

NOAA (1991), The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the national status and trends program, *NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52*, pp. 7-60.

Noh, I and Lee, KS (1999). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediment and mussels (*Mytilus edulis*) from the intertidal zone of Kori nuclear power plant, Korea, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 5(1), pp. 47-58.

Oh, JK, Do, JD and Jo, YG (2006). Sedimentary characteristics in the tidal flat of Janghwa-ri, Kangwha island, eastern yellow sea, *Journal of the Korean Earth Science Society*, (27)3, pp. 328-340. [Korean Literature]

Park, JH, Jung, JT, Lee, CD and Kim, JH (2013b). Study on the characteristic of the tidal flat sediment in Incheon coastal Area(II): Distribution of heavy metals and assesment of metal contamination, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, 14(3), pp. 178-189. [Korean Literature]

Park, JH, Lee, CD, Jung, JT and Kim, JH (2013a). Study on the characteristic of the tidal flat sediment in Incheon coastal Area(I): Sedimentary environments and organic matters distribution, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, 14(1), pp. 20-27. [Korean Literature]

Park, PS, Kim, NS, Yim, UH, Shim, WJ and Kim, GB (2009). Spatial and vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediment of the shipyard area in Gohyeon bay, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 12(2), pp. 68-74. [Korean Literature]

Seo, IS and Hong, JS (2004). The community ecology of benthic macrofauna on the Cheokjeon tidal flat, Incheon, Korea 2. spatio-temporal distribution patterns of the major dominant species, *The Journal of the Korean Society of Oceanography*, 9(3), pp. 93-105. [Korean Literature]

Shoelhammer, DH (2002). Variability of suspended sediment concentration at tidal to annual time scales in San Francisco Bay, USA, *Continental Shelf Research*, 22, pp. 1857-1866.

Soclo, H, Garrigues, P and Ewald, M (2000). Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in coastal marine sediments; Case studies in Contonou (Benin) and Aquitaine (France) areas, *Marine Pollution Bulletin*, 40(5), 387-396.

Venkatesan, MI, Nerono, O and Baek, J (2010). Trace organic contaminations and their sources in surface sediments of Santa Monica Bay, California, USA, *Marine Environmental Research*, 69(5), pp. 350-362.

Wake, SG, Schaffiner, C and Griger, W (1980). Polycyclic aromatic hydrocarbons in recent lake sediments II. Compounds derived from biogenic precursors during early diagenesis, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(3), pp. 403-413.

Woo, HS and Je, JG (2002). Changes of sedimentary environments in the southern tidal flat of Kanghwa island, *Ocean and Polar Research*, 24(4), pp. 167-178. [Korean Literature]

Woo, HS, Bahk, JJ, Lee, YG, Je, JG and Choi, JU (2004). Characteristics of sediments in the Kanghwa tidal flat on the west coast of Korea, *Journal of Korean Wetlands Society*, (6)1, pp. 167-178. [Korean Literature]

Xue, B, Wang, Y and Zhang, D (2013). Concentration, distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments from Lijang River, South China, *Bulletin of Environmenal Contamination and Toxicology*, 90(4), pp. 446-450.

Yang, EJ, Choi, JK, Yoo, MH, Cho, BC and Choi, DH (2005). Temporal variation in the distributions of the benthic heterotrophic protozoa and their grazing impacts on benthic bacteria and microalgae in the Ganghwa tidal flat, Korea, *The Journal of the Korean*

Society of Oceanography, 10(1), pp. 19-30. [Korean Literature]

Yim, UH, Hong, SH and Shim, WJ (2007). Distribution and characteristics of PAHs in sediments from the marine environment of Korea, *Chemosphere*, 68(1), pp. 85-92.

You, YS, Cho, CR and Cho, HS (2008). A Study on the pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the column sediments around Gwangyang bay, *Journal of the Korean society of marine environment & safety*, 14(4), pp. 257-266. [Korean Literature]

You, YS, Kim, JK and Cho, HS (2009). Pollution characteristics and loading flux of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in riverine waters of Jinhae bay, Korea, *Journal of the Korean society of marine environment & safety*, 15(4), pp. 275-282. [Korean Literature]

Yunker, MB, McDonald, RW, Vingarzan, R, Mitchell, RH, Goyette, D and Sylvestre, D (2002). *PAHs in the Fraser River Basin: A Critical Appraisal of PAH Ratios as Indicators of PAH Source and Composition*, Organic Geochemistry, 33, pp. 489-515.

○ 논문접수일 : 2013년 05월 27일
○ 심사의뢰일 : 2013년 05월 29일
○ 심사완료일 : 2013년 06월 28일