

Article

부산 연안해역의 잔류성 유기오염물질과 중금속 오염평가: 퇴적물 오염지수 적용

한기명^{1,2} · 홍상희^{1,3*} · 심원준^{1,3} · 나공태⁴ · 김경태⁴ · 하성용¹ · 장미^{1,3} · 김기범²

¹한국해양과학기술원 남해특성연구센터
(53201) 경상남도 거제시 장목면 장목 1길 41

²경상대학교 해양과학대학 해양환경공학과
(53064) 경남 통영시 인평동 천대국치길 38

³과학기술연합대학원대학교 한국해양과학기술원 해양환경공학과
(34113) 충남 대전시 유성구 가정로 217

⁴한국해양과학기술원 환경기반연구센터
(15627) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Assessment of Persistent Organic and Heavy Metal Contamination in Busan Coast: Application of Sediment Quality Index

Gi Myung Han^{1,2}, Sang Hee Hong^{1,3*}, Won Joon Shim^{1,3}, Kong Tae Ra⁴,
Kyung Tae Kim⁴, Sung Yong Ha¹, Mi Jang^{1,3}, and Gi Beum Kim²

¹South Sea Research Institute, KIOST
Geoje 53201, Korea

²Department of Marine Environmental Engineering, College of Marine Science,
Gyeongsang National University, Tongyeong 53064, Korea

³Marine Environmental Science, KIOST, University of Science and Technology
Daejeon 34113, Korea

⁴Marine Chemistry and Geochemistry Division, KIOST
Ansan 15627, Korea

Abstract : In order to assess the level of contamination and identify the priority contaminants in the Busan coast, intensive sediment sampling was conducted and persistent organic pollutants and heavy metals were analyzed. The Sediment Quality Index (SQI) was derived based on the contaminant data by comparing with Sediment Quality Guidelines (SQGs) established in Korea, Canada, and Australia/New Zealand. Toxic contaminants were found to be widely distributed across the coast. Among organic contaminants, PAHs showed the highest concentration, followed by butyltins, nonylphenols, PBDEs, DDTs, PCBs, HCHs and CHLs. Heavy metals were also abundantly detected with the highest concentration of Zn followed by Cu > Cr > Pb > Ni > As > Cd > Hg. Compared to organic contaminants, most heavy metals, except for Cu and Hg, were homogeneously distributed along the coast in a good relationship with total organic carbon of sediment particles. In general, the concentrations of organic compounds and heavy metals were highest at the inner part of harbor areas with a tendency to decline from inside areas to the outside, indicating the high loading of pollutants from harbors. A high exceedance for low-SQGs and high-SQGs was found for TBT,

*Corresponding author. E-mail : shhong@kiost.ac.kr

p,p'-DDT, p,p'-DDD, Cu and Zn. The SQI scores calculated from low-SQGs and high-SQGs were in the range of 18–100 and 54–100, respectively. The inner part of Busan Harbor, Dadaepo Harbor, and Gamcheon Harbor were observed as being regions of concern. Overall, TBT, Cu, and p,p'-DDT were the chemicals most frequently exceeding SQGs and influencing SQI scores.

Key words : persistent organic pollutant, heavy metal, sediment, sediment quality index, Busan coast

1. 서 론

퇴적물은 육상으로부터 유입된 오염물질이 축적되는 저장소이며, 저서생물이 노출되는 주요 경로가 된다. 다양한 경로를 통해 육상 또는 해상에서 유입된 오염물질은 수층의 입자에 빠르게 흡착하고 퇴적되어 해양환경에 오랜 시간 잔류하게 된다. 퇴적층에 잔류하는 오염물질은 저서생물에 생물축적(bioaccumulation)되고 먹이망을 통해 이동할 수 있다. 환경에서 잔류성이 강한 유기오염물질과 중금속류는 먹이망의 상위단계로 올라갈수록 생체농도가 급격히 증가(biomagnification)하여 생식독성, 발암성, 면역력 저하 등의 다양한 독성 영향을 일으킬 수 있다(Crosby 1998). 유기염소계 화합물, 브롬계 난연제, 다환방향족 탄화수소, 알킬페놀류 등의 대부분의 잔류성 유기오염물질들은 내분비계를 교란하는 내분비계 장애물질로 분류되고 있으며, 최근 잔류성 유기오염물질의 인체 농도와 비만과 당뇨병 발병률 간에 상관성이 있다는 주장이 제기되고 있다(Jones et al. 2008). 중금속은 미나마타병(수은), 이타이 이타이병(카드뮴)과 같은 급성 또는 만성 중독 증상을 일으키며, 내분비 기능을 저하하고 발암성 물질로 알려져 있다(Crosby 1998). 퇴적물에 잔류하는 오염물질은 탈착(desorption)과 재부유(resuspension)를 통해 공극수나 수층으로 재용출되기 때문에 잠재적인 오염원으로 인식되고 있다(Eggleton and Thomas 2004; Ruiz et al. 1996). 해양 환경 내 퇴적물은 물과 달리 시간에 따른 변동이 크지 않으며 이동성이 없어 주변 환경의 상태를 잘 반영하는 특성을 지닌다. 이에 연안해역의 오염원을 파악하고 오염특성을 평가하는데 유용한 모니터링 매체로 활용되고 있다. 주상퇴적물을 활용할 경우 시간의 경과에 따른 오염 추세를 파악할 수 있다.

국내에서도 해양 환경의 오염평가에 퇴적물을 활용한 많은 연구가 수행되어 왔다(임 등 2007; Choi et al. 2011; Hong et al. 2006; Moon et al. 2007; Yim et al. 2007). 그 결과로 다양한 오염물질의 자료들이 생산되고 있으나, 화합물마다 농도 수준과 단위가 다양하고 잠재적 독성의 수준이 다르기 때문에 일대 일의 농도비교를 하는 것은 무리가 있다. 더불어 수 많은 수치자료로 제시되는 모니터링 결과를 정책결정자가 이해하기 어려워, 복잡한 자료를 적합한 기준을 적용하여 통합하고 단순화 시켜야 한다는 필

요성이 제기되어 왔다. 이러한 필요성에 따라 다양한 환경 자료를 지수화시키는 연구가 시도되었는데, 주로 담수와 해수의 수질평가를 위해 생물학적 또는 화학적 자료를 지수화시키는 연구가 진행되었다(Hernández-Romero et al. 2004; Jarvie et al. 2002; Jiang 2006; Nazeer et al. 2014; Xu et al. 2004). 수질에 비해 상대적으로 제한적이거나 퇴적물 상태를 지수화하는 연구가 시도되었으며, 주로 잔류성이 높고, 생물에 축적되며, 독성이 있는 유기오염물질과 중금속이 대상물질로 고려되고 있다(Garpenline et al. 2002; Gredilla et al. 2014; Hong et al. 2014; Marvin et al. 2004; Shin and Lam 2001). 퇴적물의 오염을 지수화하는 방법으로 geo-accumulation index(I_{geo} , Müller 1979), Pollution Load Index(PLI, Tomlinson et al. 1980), Enrichment Factor(EF, Sutherland 2000) 등이 보고된 바 있다. I_{geo} , PLI, EF의 경우 중금속의 배경농도에 대한 오염도의 비를 오염지수로 산정한 값으로, 인위적으로 생성되어 배경농도 개념을 적용하기 힘든 잔류성유기오염물질의 오염평가에 적합하지 않다. 중금속과 유기오염물질을 모두 포함하여 퇴적물 오염지수를 산출하는 방법으로 Long and MacDonald (1998)이 제안한 Mean Sediment Quality Guideline Quotient(M-SQGs)와 캐나다 CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment)가 제안한 퇴적물지수(Sediment Quality Index, SQI)가 있다. M-SQGs는 오염물질의 농도가 퇴적물 권고기준을 초과하는 정도의 평균값에 해당한다. 캐나다 CCME의 퇴적물지수(SQI)는 물질 별 권고기준을 초과하는 정도와 더불어 초과하는 오염물질의 수를 동시에 고려하여, 해역의 오염도를 지수화하고 있다. 본 연구에서는 CCME의 방법을 부산해역의 퇴적물 오염평가에 활용하였다.

부산연안에는 인구 355만명, 사업체 27만개, 오염물질 배출사업장(폐수) 2,446개를 포함하는 대도시가 위치하고 우리나라 최고의 무역항이자 수산항이며 세계 5위의 컨테이너 항인 부산항이 위치하여, 전형적인 물류중심의 연안 도시 특성을 나타내고 있다(부산광역시 2016). 급속한 도시화와 산업화로 강과 하천을 통해 생활하수와 산업폐수가 유입되며, 선박운항을 비롯한 항만 관련 산업활동으로 인한 오염이 심화되어 왔다. 현재 부산연안은 우리나라 5개 특별관리해역의 하나로 지정되어 있다(해양수산부 2000). 부산연안 관리기본계획상 환경관리 현안으로 부산

항구역 퇴적물에 대한 중금속 관리목표(Cu, Zn은 관리기준 이하, Pb, Hg는 주의기준 이하)를 제시하고 있으며, 유기오염물질에 관한 관리 목표는 설정되어 있지 않다(국가 해양환경정보통합시스템 2016). 따라서 본 연구에서는 부산 연안해역의 표층퇴적물에 잔류하는 오염물질의 오염 현황을 파악하고, 오염물질 자료를 기초로 퇴적물 지수를 도출하여 부산 특별관리해역에서의 우선관리대상물질과 관리대상해역을 파악하고자 하였다. 퇴적물 오염평가를 위한 대상물질로는 환경에서 잘 분해되지 않아 오래 잔류하며 잠재적인 독성을 지닌 잔류성유기오염물질(persistent organic pollutants)과 중금속을 포함하였다.

2. 재료 및 방법

시료채취

부산해역 표층퇴적물 시료는 2013년 2월에 25개 정점과 2014년 2월에 12개 정점에서 채집하였다(Fig. 1). 반빈그랩(Van Veen grab)을 이용하여 퇴적물을 채취한 후 미리 세척된 스텐레스 스푼을 이용하여 표층 3 cm의 퇴적물을 잘 섞은 후 유기오염물질 분석용 시료는 세척된 유리용기에 중금속 분석용 시료는 폴리에틸렌 백에 담았다. 채취된 퇴적물 시료는 드라이아이스를 이용하여 즉시 냉동시켰고 분석 전까지 -20°C 에 냉동 보관하였다.

유기오염물질 분석

퇴적물 내 유기염소계농약류(Organochlorine Pesticides, OCPs), 폴리염화비페닐(Polychlorinated Biphenyls, PCBs),

폴리브롬화디페닐에테르(Polybrominated Diphenyl Ethers, PBDEs), 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 부틸주석 화합물(Butyltins, BTs), 노닐페놀(Nonylphenols, NPs) 분석은 Shim et al. (1999), Hong et al. (2003, 2010), Li et al. (2003), Yim et al. (2005)에서 보고한 분석법을 따랐으며 주요 분석과정은 다음과 같다.

OCPs, PCBs, PBDEs, PAHs의 분석의 경우, 균질화한 퇴적물 시료 약 20 g을 무수황산나트륨으로 수분을 제거한 후 디클로르메탄(GC^2 grade, Burdick & Jackson, USA)으로 16시간 동안 Soxhlet 추출하였다. 추출 전에 수분이 제거된 시료에 내부표준물질(PCB-103, PCB-198, ^{13}C -BDE-139, ^{13}C -BDE-209, naphthalene- d_8 , acenaphthene- d_{10} , phenanthrene- d_{12} , chrysene- d_{10} , perylene- d_{12})을 첨가하여 회수를 분석에 이용하였다. 추출액은 2-3 mL로 농축시킨 후 활성화된 구리를 사용하여 황 화합물을 제거한 후, 실리카(20 g)/알루미나(10 g) 칼럼(각각 수분함량 5%, 1% 비활성)과 고순도액체크로마토그래피(HPLC; Phenomenex사의 Phenogel 100 Å이 충전된 250×22.5 mm i.d. size-exclusion column)에 순차적으로 통과시켜 방해물질을 제거하였다. PBDE 분석의 경우, 산/염기 실리카 칼럼 크로마토그래피를 추가로 진행하였다. 산/염기 실리카 칼럼 크로마토그래피는 염기성(2 g), 중성(1 g), 산성(4 g), 중성(1 g) 실리카를 유리 칼럼(직경 1 cm)에 순서대로 충전하고 혼합유기용매 60 mL(디클로르메탄:헥산, 1:1 v/v)로 추출액을 용출시켰다. 분취액은 헥산(GC^2 grade, Burdick & Jackson, USA)으로 용매치환한 후 고순도 질소가스로 농축 후 내부표준물질(tetrachloro-m-xylene, ^{13}C -PCB-189,

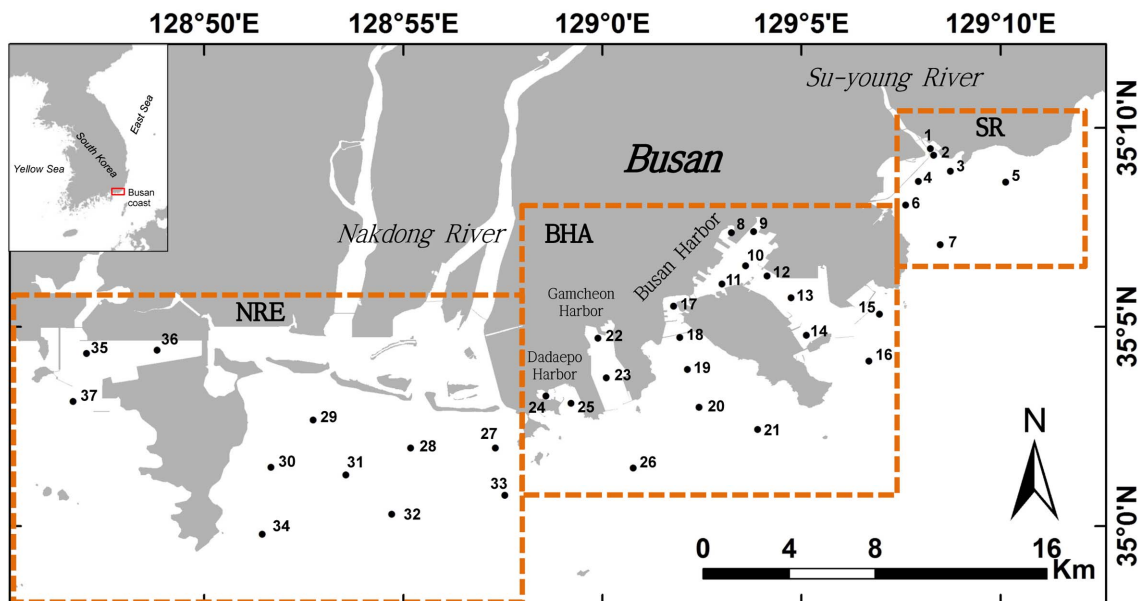


Fig. 1. Sampling locations of surface sediments in Busan coast. NRE, Nakdong River estuary; BHA, Busan harbor area; SR, Su-young River

terphenyl- d_{14})을 첨가하여 기기분석을 하였다. 기기분석은 가스크로마토그래피/질량분석기(Agilent 6890 series gas chromatograph/Agilent 5975 mass spectrometer)를 사용하였다. PCBs, OCPs는 DB-5 칼럼(30 m × 250 mm i.d. × 0.25 mm thickness, J&W Scientific)을, PAHs는 DB-5 MS 칼럼(30 m × 250 mm i.d. × 0.25 mm thickness, J&W Scientific)을 이용하여 전자충격 이온화법(Electro Impact ionization; EI)으로 정성·정량 분석하였다. PBDEs는 DB-1 칼럼(15 m × 250 mm i.d. × 0.25 mm thickness, J&W Scientific)을 이용하여 음이온 화학 이온화법(Negative Chemical Ionization; NCI)으로 정성·정량 분석 하였다. 자세한 분석 조건은 Yim et al. (2005), Hong et al. (2010, 2014)에 보고되었다.

NPs 분석의 경우, 균질화 된 퇴적물(3 g)에 내부표준물질 n-heptylphenol을 주입하고 0.1 M 염산을 5 mL 첨가하여 30분간 방치한 후, 디클로르메탄 5 mL을 첨가하여 2분간 진탕 추출하였다. 추출 후 무수황산나트륨을 첨가하여 수분을 제거하고, 활성화된 구리를 이용하여 황 화합물을 제거하였다. 추출액은 BSTFA(N,O-bis(trimethylsilyl) trifluoroacetamide)를 이용하여 유도체화시키고 플로리실 컬럼을 이용하여 방해물질을 제거한 후 가스크로마토그래피/질량분석기로 정성·정량 분석 하였다. 내부표준물질의 회수율을 구하기 위하여 기기분석 전에 phenanthrene- d_{10} 을 첨가하였다. 자세한 분석 조건은 Li et al. (2003)에 보고되었다.

TBT 분석은 동결건조 된 퇴적물(약 5.0 g)을 50 mL 폴리프로필렌 원심분리튜브에 넣고 내부표준물질 triphenyltin chloride을 시료에 첨가한 후 50%(v/v) 염산(10 mL) 넣어서 30분간 방치하였다. 이후, 0.1% tropolone이 함유된 디클로르메탄을 20 mL 넣고 교반기에서 3시간 추출하였다. 추출된 시료를 원심분리(4,000 rpm, 10분) 시킨 후 유기용매 층 4 mL을 유리 시험관에 옮겨 담아 고순도 질소가스에서 수 μ L 정도로 농축하고, n-헥산으로 용매 치환하였다. 시료에 프로필마그네슘 브로마이드(n-propylmagnesium bromide, 27% in tetrahydrofuran, ca. 2 mol/L, Tokyo Kaseikogyo Co., Japan)를 250 μ L 넣고 20분간 방치한 후, 황산(0.4 N, 4 mL)으로 중성화 시킨 다음, 용매 층을 플로리실 칼럼에 통과시켰다. 분취액에 내부표준물질 테트라부틸틴 tetrabutyltin(TeBT)을 넣고 가스크로마토그래피/꽃 광도 검출기(Agilent 5890 series gas chromatograph/flame photometric detector)를 이용하여 정성·정량 분석 하였다. 자세한 장비분석 조건은 Shim et al. (1999)에 보고되었다.

분석대상 유기오염물질은 다음과 같다: PCBs(IUPAC nos. 8, 18, 28, 29, 44, 52, 66, 87, 101, 105, 110, 118, 128, 138, 153, 170, 180, 187, 195, 200, 206, and 209),

PBDEs(IUPAC nos. 17, 28, 47, 66, 100, 99, 154, 153, 138, 183 and 209), PAHs(naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene, fluorene, phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benzo[a]anthracene, chrysene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene, benzo[a]pyrene, indeno[1,2,3-cd]pyrene, dibenzo[a,h]anthracene, benzo[ghi]perylene), 디클로로디페닐트리클로로에탄(DDT)과 분해산물(p,p'-DDE, p,p'-DDD, o,p-DDT, p,p'-DDT), 헥사클로로사이클로헥산 화합물(HCHs; α -HCH, β -HCH, γ -HCH, δ -HCH), 클로르단 화합물(CHLs; α -chlordane, γ -chlordane, cis-nonachlor, trans-nonachlor), 부틸주석화합물(TBT, DBT, MBT). 유기염소계화합물(PCBs, OCPs), PBDEs, PAHs, NPs와 butyltin 표준용액은 Ultra Scientific Inc.(North Kingston, RI, USA), Welligton Laboratories(Guelph, Ontario, USA), AccuStandard(New Haven, CT, USA), Sigma-Aldrich(St Louis, MO, USA)에서 각각 구매하였다.

내부표준물질의 회수율은 PCB-103이 78 ± 11%, PCB-198이 84 ± 11%, 13 C-BDE-139가 89 ± 11%, 13 C-BDE-209가 97 ± 21%, acenaphthene- d_{10} 이 65 ± 7%, phenanthrene- d_{10} 가 77 ± 8%, chrysene- d_{10} 이 87 ± 8%, perylene- d_{12} 가 75 ± 9%, n-heptylphenol이 83 ± 10%, triphenyltin chloride가 73 ± 6%를 나타냈다. 분석된 자료의 정확도를 검증하기 위하여 퇴적물 표준물질 NIST 1941b, NIST 1944 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA), PACS-1(National Research Council of Canada, Ottawa, Canada)을 시료와 동일한 과정으로 처리하였으며, 보증값과 측정값의 차이는 10% 이내로 양호한 결과를 얻었다.

중금속 분석

퇴적물 내 중금속(Hg 제외) 분석은 분쇄된 시료 약 0.1 g을 테프론 digestion bomb에 넣고 불산, 질산 및 과염소산(suprapur grade, Merck Co., Germany)을 가하고 가열판(hot plate)에서 24시간 동안 180°C로 가열하여 완전분해 및 증발건조 시킨 뒤(Windom et al. 1989) 1% 질산으로 재 용해 시켜 ICP-MS(Thermo Elemental X-7)로 분석하였다. 수은(Hg) 분석은 분쇄된 시료를 오븐(60°C)에서 완전히 건조시켜 수분을 제거한 뒤 US EPA method 7473에 의하여 열분해 및 금포집 방식을 이용한 Hydra-C (Teledyne Technologies Co., USA)를 이용하여 분석하였다(USEPA 2007). 총유기탄소(TOC)와 총질소(TN)는 1 N 염산으로 퇴적물 내 무기탄소를 제거한 뒤 원소분석기(Flash2000 series, Thermo Scientific Co., USA)로 분석하였다. 분석된 중금속 데이터의 정확도를 검증하기 위하여 해양퇴적물 표준물질인 MESS-3(National Research Council, Canada)를 시료와 동일한 과정으로 처리하여 분

석하였으며 보증값에 대한 회수율은 5% 이내로 양호한 결과를 얻었다.

퇴적물 지수(SQI) 도출

부산해역의 우선관리대상 물질과 관리대상 해역을 정하고, 퇴적물 오염을 종합적으로 평가하기 위하여 측정된 오염물질 자료에 캐나다의 퇴적물 지수 도출 방식(CCME 2001)을 적용하였다. 캐나다의 퇴적물 지수는 Grapentine et al. (2002)이 제안하고 CCME가 변형한 것으로서 아래의 식으로 계산된다:

$$F_1 = \left(\frac{\# \text{ of failed variables}}{\text{total \# of variables}} \right) \times 100 = \text{Scope}$$

$$F_2 = \left(\frac{mdnc}{(0.01mdnc + 0.01)} \right) = \text{Amplitude}$$

where

$$mdnc = \frac{\sum_{i=1}^p \text{non-compliance}_i}{\# \text{ of tests}};$$

$$\text{non-compliance}_i = \left(\frac{\text{failed test value}_i}{\text{guideline}_i} \right) - 1;$$

mdnc : Mean degree of non-compliance;

i : Individual guideline;

p : Total number of guidelines used.

$$SQI_s = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2}}{\sqrt{2}}$$

퇴적물 지수의 계산에 사용된 변수(variable)는 퇴적물 권고기준이 존재하는 오염물질이 선정되었다(Table 1). 총 32개 물질이 대상물질로 선정되었으며, PAHs, PCBs, 유기염소계 농약류(DDTs, CHLs, dieldrin, endrin, heptachlor epoxide), TBT, NPs, 중금속류(Zn, Cr, Cu, Ni, Cd, As, Hg, Pb)가 포함되었다. 퇴적물 권고기준(SQGs)은 캐나다 CCME(CCME 2002)에서 제시한 권고기준값을 우선적으로 고려하였고 기준값이 제시되지 않은 TBT의 경우 호주/뉴질랜드(ANZECC and ARMCANZ 2000)의 기준값을 적용하였다. 중금속의 경우, 2013년에 도출된 국내 퇴적물에 대한 주의기준과 관리기준 값을 적용하였다(해양수산부 2013).

F_1 (scope)은 총 변수 중 퇴적물기준 값을 초과하는 변수의 수로 얼마나 많은 물질이 기준치를 초과하는지를 의미하며, F_2 의 경우 얼마만큼 초과하는지를 나타내는 값이다. 계산된 퇴적물 지수는 Grapentine et al. (2002)과

Table 1. Sediment quality guidelines and percentage of the sediment samples exceeding the each SQG value

Variables	Sediment quality guideline		Exceeding rate (%)	
	Low	High	SQG-low	SQG-high
Acenaphthene ^a	6.71	88.9	11	0
Acenaphthylene ^a	5.87	128	11	0
Anthracene ^a	46.9	245	3	0
Benz[a]anthracene ^a	74.8	693	11	0
Benzo[a]pyrene+ Benzo[b]fluoranthene ^a	88.8	763	14	3
Chrysene ^a	108	846	11	0
Dibenzo[a,h]anthracene ^a	6.22	135	16	0
Fluoranthene ^a	113.	1,494	11	0
Fluorene ^a	21.2	144	3	0
2-Methylnaphthalene ^a	20.2	201	5	0
Naphthalene ^a	34.6	391	3	0
Phenanthrene ^a	86.7	544	8	0
Pyrene ^a	153	398	3	0
Lindane ^a	0.32	0.99	3	0
Chlordane ^a	2.26	4.79	0	0
p,p-DDD ^a	1.22	7.81	30	5
p,p-DDE ^a	2.07	374	14	0
p,p-DDT ^a	1.19	4.77	38	19
Dieldrin ^a	0.71	4.3	0	0
Endrin ^a	2.67	62.4	0	0
PCBs ^a	21.5	189	8	0
Heptachlor epoxide ^a	0.6	2.74	0	0
TBT (as Sn) ^b	5	70	57	22
NPs ^a	1,000	-	0	-
Zinc (Ni normalized) ^c	68.4	157	68	5
Cromium ^c	116	181	0	0
Copper (Ni normalized) ^c	20.6	64.4	43	11
Nickel ^c	47.2	80.5	0	0
Cadmium ^c	0.75	2.72	5	0
Arsenic ^c	14.5	75.5	3	0
Mercury ^c	0.11	0.62	22	0
Lead ^c	44.0	119	19	0

^aCCME, ^bANZECC, ^cSouth Korea

Marvin et al. (2004)이 제시한 퇴적물 지수 값의 범위에 따라 다섯 단계로 등급화하였다: Excellent(95–100), Good (80–94), Fair(60–79), Poor(45–59), Very Poor(0–44).

3. 결과 및 토의

퇴적물 입자 특성

부산해역 표층 퇴적물의 입도는 8.2–217 μm (평균 38.3 μm)로서, 실트, 사질 실트, 모래가 혼재하는 퇴적상을 나타냈다. 낙동강(정점 27–29)과 수영강(정점 1–2) 하구 정점에서 모래질의 조립한 퇴적상(145–217 μm)을 보였다(한국해양과학기술원 2015). 총유기탄소(TOC) 함량은 0.04–1.82%(평균: $0.96 \pm 0.48\%$)으로 검출되었다. 부산항이 위치한 BHA 지역에서 높고 낙동강과 수영강 하구에서 낮은 값을 나타내어, 입도가 높을수록 TOC 함량이 낮

은 경향을 보였다($r=0.79, p<0.001$). TOC/TN 비는 대부분 정점(정점 15 제외)에서 10 이상(범위 10–14)으로서, 플랑크톤 기원으로 추정되는 값인 6–9보다 높았으며(Meyer 1994; Meyers and Teranes 2001), 이는 부산해역의 퇴적물은 전반적으로 육상기원 유기물의 영향을 받고 있는 것을 의미한다.

표층퇴적물 중 유해물질의 오염 현황 및 분포 특성

부산해역 표층퇴적물 전반에 걸쳐 유해물질이 광범위하게 분포하였다(Fig. 2). 퇴적물 내 유기오염물질의 평균 농도(건중량)와 범위는 PCBs = 6.85 ng/g(0.02–63.3 ng/

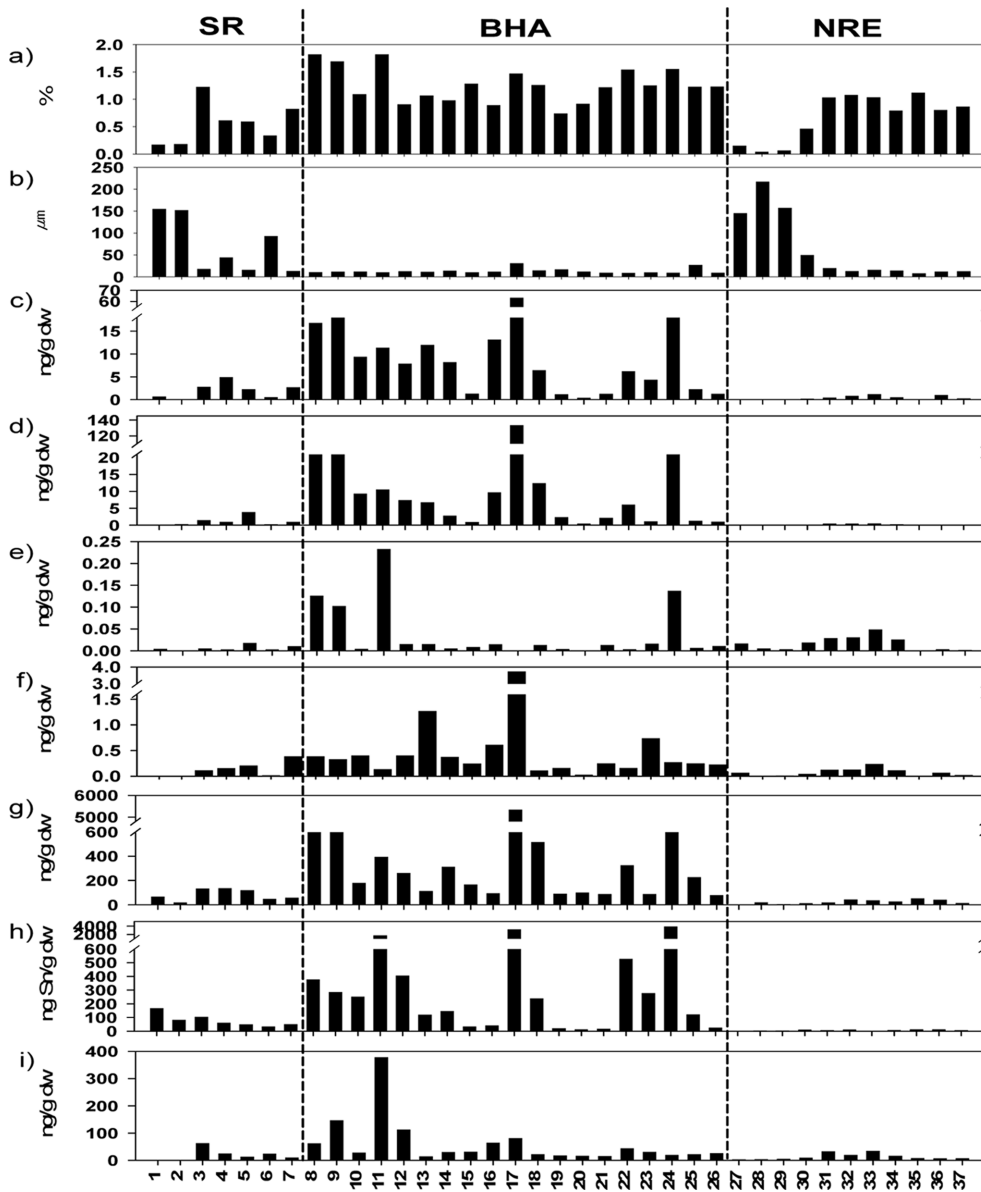


Fig. 2. Distribution of the total organic carbon (TOC), organic-, and inorganic-contaminants in surface sediments from Busan coast. (a) TOC, (b) Mz, (c) PCBs, (d) DDTs, (e) CHLs, (f) HCHs, (g) PAHs, (h) BTs, (i) NPs, (j) Cr, (k) Zn, (l) Cu, (m) Cd, (n) Ni, (o) Pb, (p) As, (q) Hg, (r) PBDEs

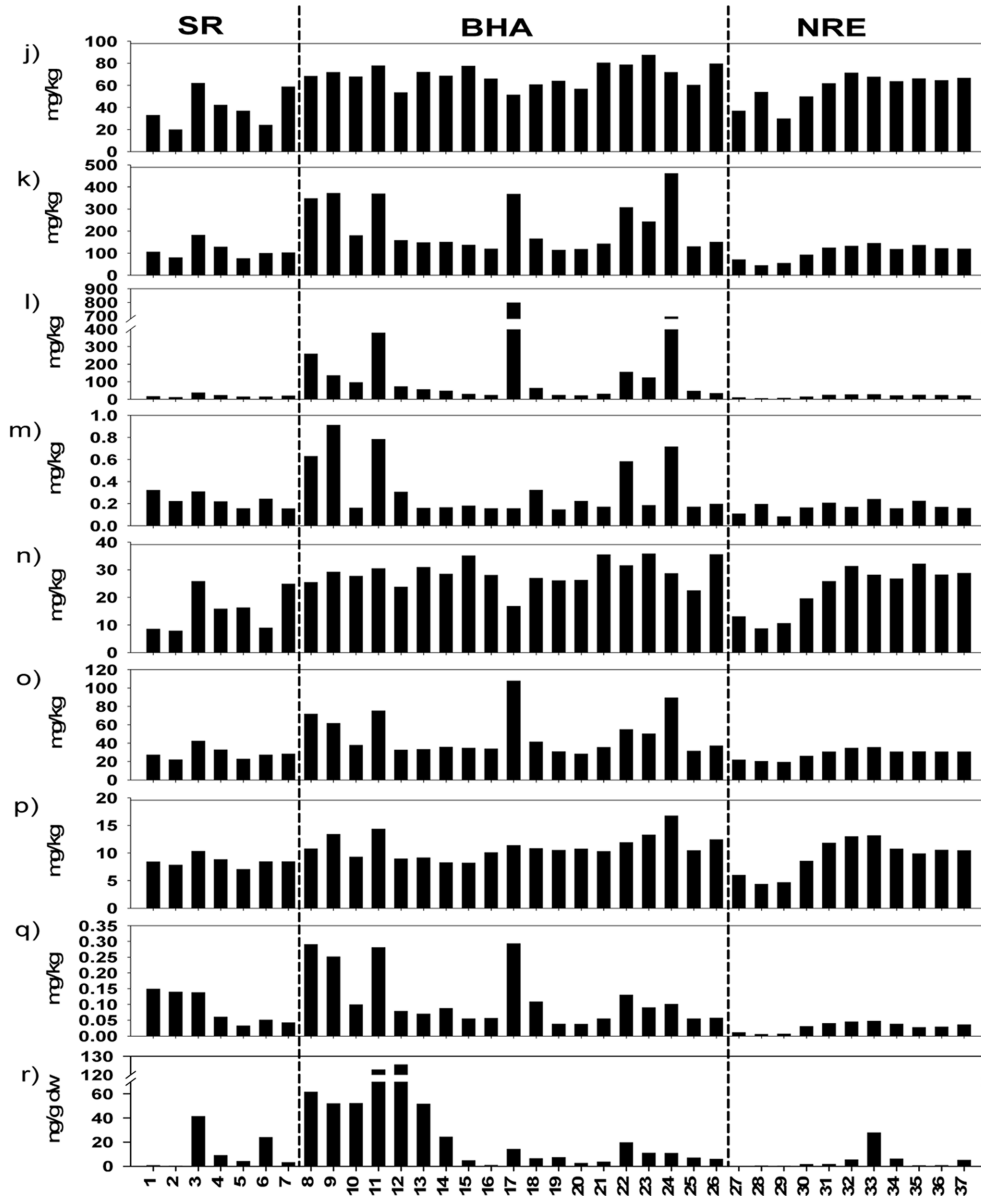


Fig. 2. Continued

g), DDTs = 8.62 ng/g(0.004–133 ng/g), CHLs = 0.03 ng/g (불검출–0.23 ng/g), HCHs = 0.32 ng/g(0.002–3.74 ng/g), PAHs = 390 ng/g(3.88–5350 ng/g), BTs = 336 ng Sn/g (불검출–3920 ng Sn/g), NPs = 39.6 ng/g(2.09–377 ng/g), PBDEs = 19.5 ng/g(0.34–126 ng/g)으로 나타났다. 대상화합물 중 PAHs가 가장 높은 농도를 보였고, 다음으로 BTs > NPs > PBDEs > DDTs > PCBs > HCHs > CHLs 순으로 나타났다. 중금속의 평균 농도(건중량)와 범위는 Zn = 166 mg/kg(44–462 mg/kg), Cu = 93 mg/kg(5.73–799 mg/kg), Cd = 0.27 mg/kg(0.08–0.91 mg/kg), Hg = 0.09 mg/kg(0.01–0.29 mg/kg), Ni = 24.5 mg/kg(7.88–35.9 mg/kg), As = 10.1 mg/kg(4.4–16.8 mg/kg), Cr = 60.2 mg/kg(20–

88 mg/kg), Pb = 39 mg/kg(20–108 mg/kg)으로 나타났다. Zn가 가장 높은 농도를 나타냈고, 다음으로 Cu > Cr > Pb > Ni > As > Cd > Hg의 순으로 나타났다.

Cr, Ni, As를 제외한 중금속류와 대부분의 유기오염물질은 부산 북항과 남항 내측(정점 8–11, 17)과 감천항과 다대포항 내측(정점 22, 24)에서 높은 농도를 나타냈다 (Fig. 2). 한편, 퇴적물이 조립하고 TOC 함량이 낮은 낙동강과 수영강 하구 정점에서는 중금속류와 유기오염물질 모두 낮은 농도를 나타냈다. 부산해역 표층퇴적물 중 오염물질의 분포 특성을 종합적으로 파악하기 위하여 각 정점에서 측정된 오염물질의 농도를 주요인분석(PCA, Principal Component Analysis)에 적용하였다(Fig. 3). 화합물 간의

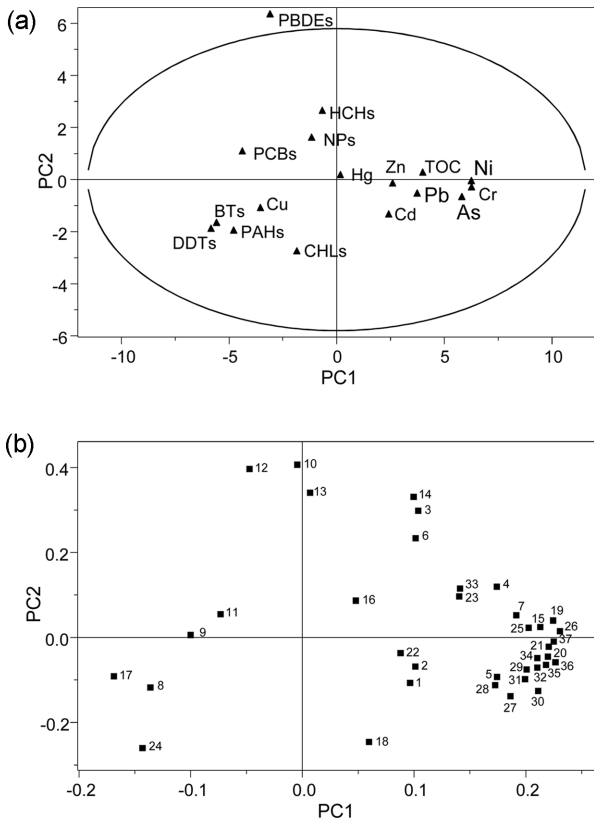


Fig. 3. Principal component analysis; (a) score plot and (b) loading plot of organic and inorganic contaminants in sediments from Busan coast. The concentration data normalized with mean value of each compound was applied for the analysis. PC1 and PC2 account of for 49% and 12%, respectively

상이한 농도 단위와 수준에 따른 영향을 최소화시키고 해역 전반에 걸친 화합물별 공간 분포 패턴의 차이를 비교할 수 있도록, 각 화합물의 평균값으로 각 정점의 오염물질 자료를 보정한 후 주요인분석을 시행하였다. 주요인(PC, Principal Component) 1과 2는 각각 전체 데이터변동의 49%와 12%를 설명하였다. Score plot 상에 오염물질의 분포를 살펴보면, 정점간 농도 차가 크지 않고 대체로 균일한 분포를 나타내는 화합물은 Score plot의 우측에 위치하며, 정점간 농도 구배가 큰 물질은 좌측에 위치하고 있다. Cu와 Hg을 제외한 중금속류의 대부분이 score plot 우측에 위치하여 정점간 농도 차이가 작으며, 퇴적물의 TOC 분포와 밀접한 상관성을 나타냈다. 한편, 대부분의 유기오염물질들은 score plot 좌측에 위치하여 서로 간의 높은 상관성을 나타냈으며, 이는 이들이 유사한 오염원으로부터 유래되었음을 시사한다. PCBs, DDTs, BTs, PAHs, Cu, PBDEs는 score plot의 좌측에 위치하여 정점간의 농도 구배가 크고, 특히 loading plot의 좌측에 위치한 정점

에서 높은 농도로 분포하는 특성을 보였다. Loading plot의 좌측에 위치한 정점의 대부분은 항만의(부산항, 다대포항) 내측에 위치한 정점에 해당한다. 이는 항만 및 선박 관련 활동이 부산해역의 주요 오염원이 되고 있음을 시사한다. 실제로, 항만의 내측에서 외측으로 나아갈수록 오염물질의 농도가 감소하여 오염원 주변에서 보이는 전형적인 오염물질 분포 특성을 나타냈다(Fig. 2).

부산해역의 주요 오염원인 부산 북항(정점 8-11) 표층 퇴적물 중 유기오염물질의 농도(PCBs = 19.2 ± 13.7 ng/g, DDTs = 20.7 ± 13.6 ng/g, HCHs = 0.32 ± 0.12 ng/g, PAHs = 888 ± 721 ng/g, BTs = 666 ± 725 ng Sn/g, PBDEs = 72.2 ± 34.0 ng/g)는 2000년대 초반에 측정된 PCBs(98 ± 85 ng/g), DDTs(21 ± 14 ng/g), HCHs(3.0 ± 1.4 ng/g), PAHs(888 ± 721 ng/g), BTs(590 ng Sn/g), PBDEs(494 ng/g)의 농도 보다 낮은 감소하는 추세를 나타냈다(해양수산부 2001; Choi et al. 2009; Hong et al. 2006; Moon et al. 2007; Yim et al. 2007). 한편, 대부분의 중금속류(Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb)의 농도는 2000년대 초반과 비슷한 수준을 나타냈고, 수은의 경우 평균 농도가 0.54 mg/kg에서 0.23 ± 0.09 mg/kg으로 소폭 감소하였다(Choi et al. 2012).

부산해역 퇴적물 중 오염물질 농도와 국내·외 산업화된 해역의 오염 자료를 Table 2에 비교하였다. 부산해역 퇴적물 중 유기오염물질의 농도는 진해만(Hong et al. 2014)과 광양만(한국해양과학기술원 2013)에 비해 상대적으로 높은 수준을 나타냈으며, 부산해역 > 진해만 > 광양만의 오염도를 나타냈다. 한편, 중금속의 농도는 진해만과 대체로 유사한 수준을 나타냈고, 광양만 보다 높은 경향(Cd과 As 제외)을 보였다. 부산해역 유기오염물질의 농도는 홍콩의 빅토리아항(Hong et al. 1995; Zheng et al. 1999)과 미국 샌프란시스코만(Oros et al. 2005; Pereira et al. 1999)과 대체로 유사한 수준이며, 중국 다야만(Zhou et al. 2001)과 일본 도쿄만(Minh et al. 2007)에 비해 상대적으로 높았다. 중금속의 경우, 중국 다야만(Yu et al. 2010), 홍콩 빅토리아항(Tang et al. 2008)에 비해 상대적으로 높고, 도쿄만(Fukushima et al. 1992; Kobayashi et al. 2010)보다 상대적으로 낮은(Cu 제외) 경향을 보였다.

대상화합물의 조성

PCB 동족체(homologue) 구성비는 염소(Cl)가 5-7개 치환된 penta-, hexa-, hepta-CBs가 $74 \pm 15\%$ 로 우세하였고, 이는 선행 연구결과와 유사하다(Hong et al. 2005). DDT 화합물의 조성은 DDD(42%) > DDT(36%) > DDE(22%)로 분해산물의 조성이 모화합물인 DDT 보다 전반적으로 우세하여, 과거에 유입된 DDT가 환경에서 상당량 분해되었으며 신규 유입은 제한적인 것으로 해석된다. HCH 화

Table 2. Comparison of persistent organic pollutants and heavy metals in coastal sediments from Korea and other countries (PCBs, DDTs, PBDEs, ng/g dry wt.; BTs: ng/g Sn dry wt.; heavy metals: µg/g dry wt.)

Location	PCBs	DDTs	PBDEs	BTs	PAHs	Zn	Cu	Cd	As	Reference
Jinhae Bay, Korea	0.31–9.91 (1.81) ^a	0.02–13.6 (1.12)	0.11–57.6 (5.28)	n.d. ^b –913 (210)	12.4–2430 (208)	95.2–443 (190)	20.9–114 (54)	0.01–2.15 (0.56)	9.9–19.2 (13.9)	Hong et al. (2014)
Gwangyang Bay, Korea	0.03–2.73 (0.65)	0.02–2.09 (0.2)	0.04–14.0 (2.19)	7–212 (106)	14–344 (64.2)	38–184 (110)	5.33–42.3 (19.2)	n.d.–0.49 (0.13)	3.4–11.0 (7.32)	KIOST (2013)
Daya Bay, China	0.85–27.4 (8.83)	0.14–20.3 (2.7)			42.5–158 (126)	53–114 (94)	2.35–48.7 (12.7)			Zhou et al. (2001) Yu et al. (2010)
Victoria Harbor, Hong Kong	3.2–16 (8.9)	1.38–25.4 (10.2)			51.9–4420	52–221	16–280			Hong et al. (1995) Tang et al. (2008) Zheng et al. (1999)
Tokyo Bay, Japan	2.7–110		0.94–18.8 (5.9)			106–405 (276)	16.6–79.8 (49.7)	0.53–1.4 (1.0)		Fukushima et al. (1992) Minh et al. (2007) Kobayashi et al. (2010)
San Francisco Bay, USA			n.d.–212		40–6300					Oros et al. (2005) Pereira et al. (1999)
Busan coast, Korea	0.02–63.3 (6.85)	n.d.–133 (8.62)	0.34–126 (19.5)	n.d.–3919 (336)	3.88–5346 (390)	44–462 (166)	5.73–799 (93)	0.08–0.91 (0.27)	4.4–16.8 (10.1)	This study

^amean value, ^bnot detected

합물의 조성비($\alpha:\beta:\gamma:\delta$)는 27%:23%:36%:14%로서 γ -HCH의 조성비가 상대적으로 높았다. γ -HCH의 상대적으로 높은 조성은 최근 technical-HCHs의 유입은 제한적이며 γ -HCH를 정제하여 생산된 린단(lindane)의 유입이 상대적으로 우세했음을 시사한다(Walker et al. 1999). 현재 린단을 주요 성분으로 하는 머릿니 제거용 의약품이 약국에서 시판되고 있다. 클로르단 화합물(CHLs)의 조성은 난분해적 성향이 상대적으로 강한 trans-nonachlor의 조성이 58%로서 가장 높아, 해양환경으로 CHL 화합물의 신규 유입은 제한적인 것으로 판단된다(Iwata et al. 1993). 총부틸주석 농도 중 MBT, DBT 및 TBT의 각 화합물농도 조성비는 48%, 21%, 28%로 항만 내측과 외측 해역 모두에서 분해산물의 조성이 상대적으로 높게 검출되어, 2003년 TBT의 전면 규제 이후 신규 유입보다는 과거에 유입된 TBT가 분해되는 과정에 있음을 나타냈다. PAH 화합물의 경우, Fluoranthene/Pyrene(Flu/Pye) 비와 Phenanthrene/

Anthracene(Phen/Anth) 비로 오염원을 판별한 결과 부산항 내측에 위치한 정점에서는 유류기원(Flu/Pye < 1, Phen/Anth < 10)의 오염원의 영향을 받는 것으로 보여졌고, 그의 정점은 유류와 연소기원의 오염이 혼합되는 경향을 나타냈다(Budzinski et al. 1997).

퇴적물지수(SQI) 도출

표층퇴적물에서 측정된 유기오염물질 및 중금속 32개 대상물질의 농도를 퇴적물 권고기준과 비교하여 Table 1에 제시하였다. 32개 화합물(변수) 중 25개가 권고기준 하한값(SQG-low) 초과하며, 6개 화합물이 권고기준 상한값(SQG-high)을 초과하였다. PAHs(3-16%), PCBs(8%), DDTs(14-38%), TBT(57%), Zn(68%), Cu(43%), Cd(5%), As(3%), Hg(22%), Pb(19%)가 권고기준 하한값을 초과하였다. 한편, benzo[a]pyrene+benzo[b]fluoranthene(3%), p,p'-DDD(5%), p,p'-DDT(19%), TBT(22%), Zn(5%), Cu

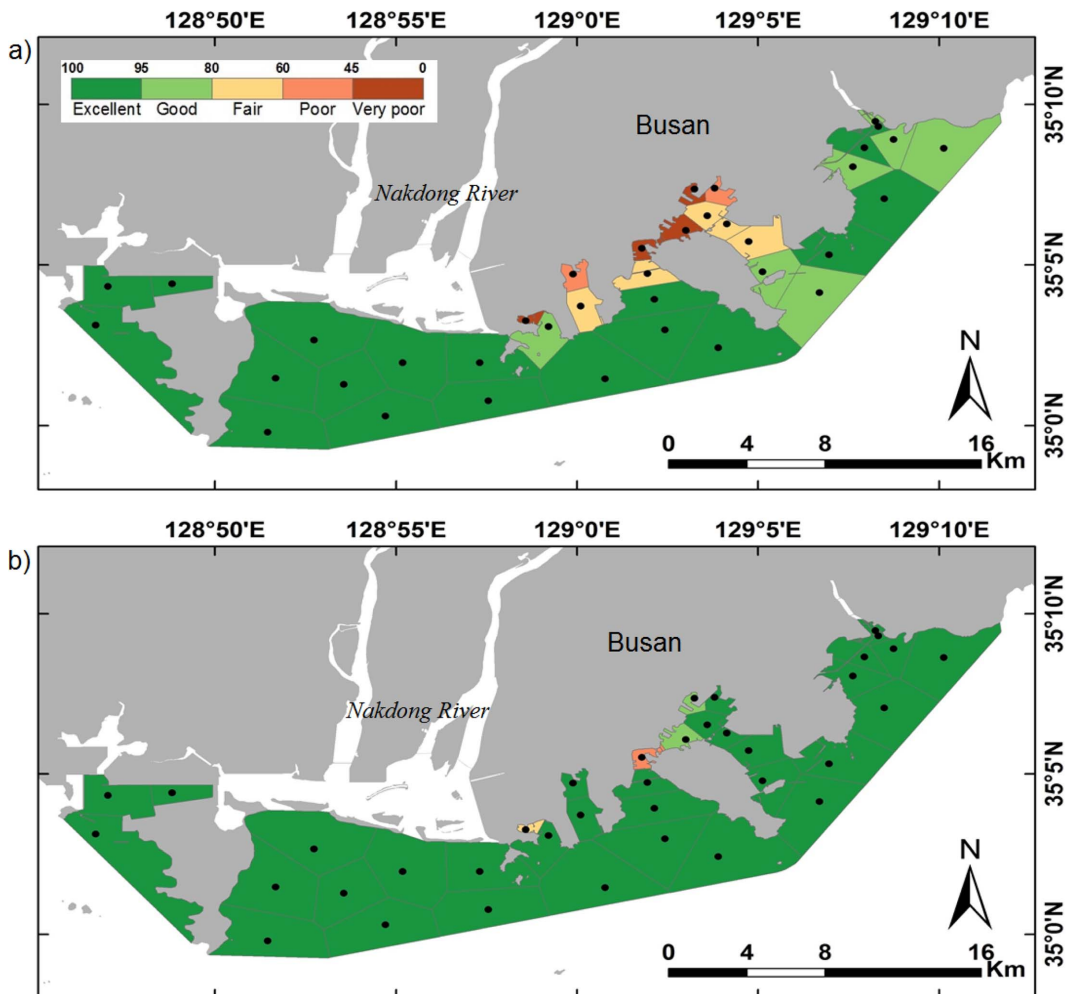


Fig. 4. Distribution map of the SQIs applied with (a) SQG-low and (b) SQG-high in Busan coast. Each sampling station represents designated area which is expressed as Thiessen polygon

(11%)가 권고기준 상한값을 초과하였다. 퇴적물 권고기준 상한값을 초과하는 정점은 정점 8-12, 17, 22-24로써 부산 북항과 남항, 감천항과 다대포항의 내측으로 모두 항만 정점에 해당한다. 대상화합물 중 TBT가 가장 높은 비율로 권고기준(상한값 및 하한값)을 초과하였고, 다음으로 Cu와 p,p'-DDT가 높은 초과율을 나타냈다. 제2차 부산연안특별관리해역 부산항권역 퇴적물의 관리계획에서는 부산항권역 퇴적물에 대해 Cu, Zn는 관리기준 이하, Pb, Hg은 주의기준 이하로 관리목표 설정하고 있다. 부산항권역 8개 정점(8-13, 17-18) 중 Cu와 Zn는 각각 5개 정점과 4개 정점에서 권고기준(Cu:64.4 mg/kg, Zn:157 mg/kg)을 초과하였고, Pb와 Hg은 4개 정점에서 주의기준(Pb:44 mg/kg, Hg:0.11 mg/kg)을 초과하고 있어, 아직 관리목표에 미치지 못한 상황으로 파악되었다.

퇴적물에서 검출된 32개 오염물질의 농도 자료와 퇴적물 권고기준을 기초로 퇴적물 지수를 산출하여 Fig. 4에 제시하였다. 권고기준 상한값을 적용할 경우, 1개 정점(17)이 'Poor', 2개 정점(11, 24)이 'Fair', 2개 정점이 'Good', 32개 정점이 'Excellent'로 산정되었으며 'Very Poor'는 없었다. 권고기준 하한값을 적용할 경우, 4개 정점(8, 11, 17, 24)이 'Very Poor', 2개 정점(9, 22)이 'Poor', 5개 정점(10, 12, 13, 18, 23)이 'Fair', 7개 정점이 'Good', 19개 정점이 'Excellent'로 산정되었다. 부산 북항과 남항, 다대포항, 감천항 등 항만의 내측에서 낮은 퇴적물 등급을 나타냈으며, 항의 내측에서 외측으로 나아가면서 퇴적물 지수가 개선되는 경향을 명확히 확인할 수 있었다. 이와 같은 퇴적물 지수의 분포는, 항만의 내측에서 이뤄지는 활동(선박활동, 중소형 조선소 등)이 부산해역의 주요 오염원이 되고 있으며 중점 관리 되어야 함을 의미한다. 해당 지역의 낮은 퇴적물 지수에 영향을 미친 주요 화합물은 TBT, DDT 화합물, Cu, Zn, PAH 화합물이며, 이 중 선박의 방오도료로 사용된 것으로 알려진 TBT와 Cu, 잔류성 농약류이자 최근까지 중국에서 선박의 방오도료에 사용된 것으로 알려진 p,p'-DDT의 권고기준 초과빈도와 초과비율이 가장 높았다. 이는 부산해역 퇴적물 오염평가에 있어 TBT, Cu, p,p'-DDT가 평가항목으로 고려되어야 할 필요가 있음을 시사한다. 한편, 수영강과 낙동강 입구 정점의 퇴적물 지수는 대부분 'Good' 또는 'Excellent'의 높은 등급을 보였는데, 이는 해당 지역의 퇴적물 입자가 조립하고 유기물 함량이 낮아 오염물질의 흡착과 축적이 낮은 점이 영향을 준 것으로 사료되며, 해당 해역의 경우 다른 환경매질을 활용한 평가가 필요하다.

부산해역과 진해만 해역(Hong et al. 2014)의 퇴적물 오염도를 퇴적물 지수로 비교하면, 두 해역 모두 'Excellent'와 'Good'의 합이 각각 70%, 74%로 비슷한데 반해, 'Poor'와 'Very Poor'의 합이 각각 16%, 8%로서 부산해

역이 진해만에 비해 퇴적물 오염도가 상대적으로 높은 것으로 파악되었다. 진해만의 퇴적물 지수에 영향을 미친 주요 화합물은 TBT, p,p'-DDT, Zn였고, 부산해역은 TBT, p,p'-DDT, Cu로 나타나 두 해역이 유사한 오염원(선박활동)의 영향을 받는 것으로 보인다. 이에 진해만의 경우 대형조선소가 위치한 고현만에서 부산해역의 경우 부산항에서 가장 낮은 퇴적물 지수를 나타냈다.

본 연구에서는 국내·외에 가용한 퇴적물 기준이 있는 32개 오염물질(변수)을 대상으로 퇴적물 지수를 도출하였다. 퇴적물 지수가 기준치를 초과하는 물질의 빈도(scope)와 초과 정도(amplitude)를 기초로 계산되었기 때문에, 어떠한 물질이 고려되었는지가 퇴적물 지수의 값을 결정하는 주요 요인이 될 수 있다. 다시 말하면, 연구해역에서 문제가 되고 있는 물질이 변수 목록에서 빠져있다면 도출된 퇴적물 지수로 해역의 오염을 제대로 설명하기 어렵다. 따라서 해역의 오염평가에 있어 평가항목을 제대로 선정하는 것이 무엇보다 중요하다. PBDEs의 경우, 퇴적물 기준이 없어 지수를 도출하는데 활용되지 못하였다. 즉, 환경지수를 오염관리에 활용할 때 환경기준이 없는 신규 오염물질의 오염이 통합 지수에 반영되어 있지 않다는 점을 감안해야 한다. 우리나라의 경우 중금속류를 제외한 유기오염물질의 퇴적물 기준이 아직 마련되지 못한 상황으로 우리나라 실정에 맞는 퇴적물 환경기준이 우선적으로 설정되어야 할 것이다.

퇴적물 지수와 같이 환경자료를 통합하고 단순화시킨 자료는 정책결정자와 관리자가 오염 실태를 파악하고 오염예방을 위한 우선순위를 정하는데 유용하게 활용될 수 있다. 더불어 지역별 오염 수준을 비교하고 추세를 파악하는데 도움을 주며, 연구자와 정책결정자, 대중 간의 의사소통을 돕는 수단이 될 수 있다. 그러나, 환경지수를 오염평가에 활용하기 위해서는 환경지수가 갖는 단점을 이해할 필요가 있다. 방대한 변수를 한 개의 변수로 통합하는 과정에서 개개의 물질 정보와 물질 간의 상관관계에 대한 정보가 유실될 수 있다. 따라서, 기초 자료의 이해를 바탕으로 환경지수가 활용될 필요가 있다. 즉, 환경지수는 물질 별 자료를 기초로 해석하는 기존의 방식을 완전히 대체하는 수단이기 보다는 통합된 정보를 제공하는 수단이 될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 부산연안 특별관리해역 내 37개 정점에서 표층퇴적물을 채취하여 잔류성이 높은 유기오염물질과 중금속의 오염수준과 오염특성을 파악하고 캐나다의 퇴적물 지수 도출법을 적용하여 우선관리대상물질과 우선관리대상해역을 파악하고자 하였다. 오염물질의 농도가 퇴적

물 기준을 초과하는 빈도와 초과 비율을 기초로 산출된 퇴적물 지수는 부산항에서 가장 낮고 다대포항과 감천항에서도 낮아, 항만활동이 부산해역의 주요 오염원이 되고 있으며 항만의 내측이 우선 관리가 필요한 해역으로 파악되었다. 대상물질 중 TBT, Cu, p,p'-DDT가 가장 빈번하고 높은 비율로 권고기준을 초과하여 우선관리대상물질로 파악되었다. 제2차 부산연안특별관리해역 관리계획에서는 부산항권역의 퇴적물에 한해 Cu, Zn, Pb, Hg에 관한 관리목표를 제시하고 있으나, 유기오염물질에 관한 관리방안은 제시되어 있지 않으며 부산항과 더불어 오염도가 높은 다른 항만에 대한 고려는 없는 상황이다. 부산연안에서 도출된 퇴적물 지수는 개별 오염물질의 분포와 오염도를 종합적으로 잘 반영하고 있어, 해역의 오염평가에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나, 신규물질의 오염도를 반영하지 못한다는 점에 대한 고려가 필요하며, 유기오염물질에 대한 우리나라 퇴적물 기준이 마련되어 우리나라 실정에 맞는 오염평가가 이뤄질 필요가 있다.

사 사

본 연구는 한국해양과학기술원 “남해특별관리해역의 해양생태계 건강지수개발(PE99316)”과 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원 “해양환경 유해물질의 평가 및 관리기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 퇴적물지수 분포도를 그려주신 해양자료실 최현우 박사님, 윤동영 님께 감사드립니다.

참고문헌

- 국가해양환경정보통합시스템 (2016) 부산연안 관리기본계획. http://meis.kgis.co.kr/rest/mansea_plan07 Accessed 2 Apr 2016
- 부산광역시 (2016) 부산통계. <http://www.busan.go.kr> Accessed 2 Apr 2016
- 임동일, 최진용, 정희수, 최현우, 김영옥 (2007) 한국 연안 퇴적물 내 중금속 원소의 자연적 배경농도 연구. *Ocean Polar Res* **29**(4):379-389
- 한국해양과학기술원 (2013) 남해 특별관리해역 생태계 건강지수 개발. 한국해양과학기술원, BSPE98745-10195-3, 180 p
- 한국해양과학기술원 (2015) 남해 특별관리해역 생태계 건강지수 개발. 한국해양과학기술원, BSPE99191-10192-3, 159 p
- 해양수산부 (2000) 환경보전해역 및 특별관리해역지정. 해양수산부고시 제2000-3호, 123 p
- 해양수산부 (2001) 전국연안의 지속성 유기물질 오염실태 조사 연구. BSPM 00070-1336-3, 123 p
- 해양수산부 (2013) 해양수질과 퇴적물의 권고기준. 해양수산부고시 제2013-186호. <http://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=5489&boardKey=35&menuKey=402¤tPageNo=1> Accessed 3 Mar 2016
- ANZECC and ARMCANZ (2000) National water quality management strategy, Australian and New Zealand Guidelines for fresh and marine water quality. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council and Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand, Canberra, 27 p
- Budzinski H, Jones I, Bellocq J, Piérard C, Garrigues P (1997) Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. *Mar Chem* **58**:85-97
- CCME (2001) Canadian water quality index 1.0, Technical Report. http://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/calculator.html Accessed 2 Jan 2010
- CCME (2002) Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. <http://st-ts.ccme.ca/en/index.html> Accessed 2 Jan 2010
- Choi HG, Moon HB, Choi MK, Yu J (2011) Monitoring of organic contaminants in sediments from the Korean coast: spatial distribution and temporal trends (2001-2007). *Mar Pollut Bull* **62**:1352-1361
- Choi KY, Kim SH, Hong GH, Chon HT (2012) Distributions of heavy metals in the sediments of South Korean harbors. *Environ Geochem Hlth* **34**:71-82
- Choi M, Moon HB, Yu J, Eom JY, Choi HG (2009) Butyltin contamination in industrialized bays associated with intensive marine activities in Korea. *Arch Environ Contam Toxicol* **57**(1):77-85
- Crosby DG (1998) Environmental toxicology and chemistry. Oxford University Press, New York, 336 p
- Eggleton J, Thomas KV (2004) A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environ Int* **30**(7):973-980
- Fukushima K, Saino T, Kodama Y (1992) Trace metal contamination in Tokyo Bay, Japan. *Sci Total Environ* **125**:373-389
- Garpentine L, Marvin C, Painter S (2002) Initial development and evaluation of a sediment quality index for the Great Lakes region. *Hum Ecol Risk Assess* **8**:1549-1567
- Gredilla S, Vallejuelo SF, Diego A, Arana G, Madariaga JM (2014) A new index to sort estuarine sediments according to their contaminant content. *Ecol Indic* **45**:364-370
- Hong H, Xu L, Zhang L, Chen JC, Wong YS, Wan TSM (1995) Environmental Fate and Chemistry of Organic Pollutants in the Sediment of Xiamen and Victoria

- Harbours. *Mar Pollut Bull* **31**:229–236
- Hernández-Romero AH, Tovilla-Hernández C, Malo EA, Bello-Mendoza R (2004) Water quality and presence of pesticides in a tropical coastal wetland in southern Mexico. *Mar Pollut Bull* **48**:1130–1141
- Hong SH, Yim UH, Shim WJ, Oh JR, Lee IS (2003) Horizontal and vertical distribution of PCBs and chlorinated pesticides from Masan Bay, Korea. *Mar Pollut Bull* **46**:244–253
- Hong SH, Yim UH, Shim WJ, Oh JR (2005) Congener-specific survey for polychlorinated biphenyls in sediments of industrialized bays in Korea: regional characteristics and pollution sources. *Environ Sci Technol* **39**:7380–7388
- Hong SH, Yim UH, Shim WJ, Li DH, Oh JR (2006) Nationwide monitoring of polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides in sediments from coastal environment of Korea. *Chemosphere* **64**:1479–1488
- Hong SH, Kannan N, Jin YN, Won JH, Han GM, Shim WJ (2010) Temporal trend, spatial distribution, and terrestrial sources of PBDEs and PCBs in Masan Bay, Korea. *Mar Pollut Bull* **60**:1836–1841
- Hong SH, Han GM, Yim UH, Lim DI, Ha SY, Kim NS, Shim WJ (2014) Integrative assessment of sediment quality in terms of chemical contamination in Jinhae bay, South Korea. *Ocean Sci J* **49**(3):265–278
- Iwata H, Tanabe S, Sakai N, Tatsukawa R (1993) Distribution of persistent organochlorines in the Oceanic air and surface seawater and the role of ocean on their global transport and fate. *Environ Sci Technol* **27**:1080–1098
- Jarvie HP, Lycett E, Neal C, Love A (2002) Patterns in nutrient concentrations and biological quality indices across the upper Thames river basin, UK. *Sci Total Environ* **282/283**:263–294
- Jiang JG (2006) Development of a new biotic index to assess freshwater pollution. *Environ Pollut* **139**:306–317
- Jones OAH, Maguire ML, Griffin JL (2008) Environmental pollution and diabetes: a neglected association. *Lancet* **371**:287–288
- Kobayashi J, Serizawa S, Sakurai T, Imaizumi Y, Suzuki N, Horiguchi T (2010) Spatial distribution and partitioning of polychlorinated biphenyls in Tokyo Bay, Japan. *J Environ Monitor* **12**:838–845
- Li D, Oh JR, Park JM (2003) Direct extraction of alkylphenols, chlorophenols and bisphenol A from acid-digested sediment suspension for simultaneous gas chromatographic-mass spectrometric analysis. *J Chromatogr A* **1012**:207–214
- Long ER, MacDonald DD (1998) Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems. *Hum Ecol Risk Assess* **4**:1019–1039
- Marvin C, Grapentine L, Painter S (2004) Application of a sediment quality index to the lower Laurentian Great Lakes. *Environ Monit Assess* **91**:1–16
- Meyers PA (1994) Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chem Geol* **114**:289–302
- Meyers PA, Teranes JL (2001) Sediment organic matter. In: Last WM, et al. (eds) *Tracking environmental changes using lake sediments, volume 2: Physical and chemical techniques*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 239–269
- Minh NH, Isobe T, Ueno D, Matsumoto K, Mine M, Kajiwara N, Takahashi S, Tanabe S (2007) Spatial distribution and vertical profile of polybrominated diphenyl ethers and hexabromocyclododecanes in sediment core from Tokyo Bay, Japan. *Environ Pollut* **148**:409–417
- Moon HB, Kannan K, Lee SJ, Choi M (2007) Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in sediment and bivalves from Korean coastal waters. *Chemosphere* **66**:243–251
- Müller G (1979) Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau Wissensch Tech* **79**:778–783
- Nazeer S, Hashmi MZ, Malik RN (2014) Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan. *Ecol Indic* **43**:262–270
- Oros DR, Hoover D, Rodigari F, Crane D, Sericano J (2005) Levels and distribution of polybrominated diphenyl ethers in water, surface sediments, and bivalves from the San Francisco Estuary. *Environ Sci Technol* **39**:33–41
- Pereira WE, Hostettler FD, Luoma SN, van Geen A, Fuller CC, Anima RJ (1999) Sedimentary record of anthropogenic and biogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in San Francisco Bay, California. *Mar Chem* **64**:99–113
- Ruiz JM, Bachelet G, Caumette P, Donard OFX (1996) Three decades of tributyltin in the coastal environment with emphasis in Arcachon Bay, France. *Environ Pollut* **93**:195–203
- Shim WJ, Oh JR, Kahng SH, Shim JH, Lee SH (1999) Horizontal distribution of butyltins in surface sediments from an enclosed bay system, Korea. *Environ Pollut* **106**:351–357
- Shin PKS and Lam WKC (2001) Development of a marine sediment pollution index. *Environ Pollut* **113**:281–291
- Sutherland RA (2000) Bed sediment-associated trace metals

- in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environ Geol* **39**: 611–627
- Tang CW, Ip CC, Zhang G, Shin PKS, Qian P, Li X (2008) The spatial and temporal distribution of heavy metals in sediments of Victoria Harbour, Hong Kong. *Mar Pollut Bull* **57**:816–825
- Tomlinson DC, Wilson JG, Harris CR, Jeffrey DW (1980) Problems in the assessment of heavy metals in estuaries and the formation pollution index. *Helgoland Mar Res* **33**:566–575
- USEPA (2007) Method 7473, Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation, and atomic absorption spectrometry, revision 0. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/7473.pdf/> Accessed 25 Mar 2016
- Walker K, Vallero DA, Lewis RG (1999) Factors influencing the distribution of lindane and other hexachlorocyclohexanes in the environment. *Environ Sci Technol* **33**(24): 4373–4378
- Windom HL, Schropp SJ, Calder FD, Ryan JD, Smith RG, Burney LC, Lewis FG, Rawlinson CH (1989) Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediment of the southeastern United States. *Environ Sci Technol* **23**:314–320
- Xu FL, Lam KC, Zhao ZY, Zhan W, Chen YD, Tao S (2004) Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecol Model* **173**:355–370
- Yim UH, Hong SH, Shim WJ, Oh JR, Chang M (2005) Spatio-temporal distribution and characteristics of PAHs in sediments from Masan Bay, Korea. *Mar Pollut Bull* **50**:319–326
- Yim UH, Hong SH, Shim WJ (2007) Distribution and characteristics of PAHs in sediments from the marine environment of Korea. *Chemosphere* **68**:85–92
- Yu X, Yan Y, Wang WX (2010) The distribution and speciation of trace metals in surface sediments from the Pearl River Estuary and the Daya Bay, Southern China. *Mar Pollut Bull* **60**:1364–1371
- Zheng GJ, Richardson BJ (1999) Petroleum hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Hong Kong marine sediment. *Chemosphere* **38**:2625–2632
- Zhou JL, Maskaoui K, Qiu Y, Hong HS, Wang Z (2001) Polychlorinated biphenyl congeners and organochlorine insecticides in the water column and sediments of Daya Bay, China. *Environ Pollut* **113**:373–384

국문 참고자료의 영어 표기

English translation/Romanization of references originally written in Korean

- Marine Environment Information System (2016) Busan coastal management plan. http://meis.kgis.co.kr/rest/mansea_plan07 Accessed 2 Apr 2016
- Busan metropolitan city (2016) Facts and statistics. <http://www.busan.go.kr> Accessed 2 Apr 2016
- Lim DI, Jung JY, Jung HS, Choi HW, Kim YO (2007) Natural background level analysis of heavy metal concentration in Korean coastal sediments. *Ocean Polar Res* **29**(4):379–389
- KIOST (2013) Development of marine ecosystem health index in the special management areas of the south sea. KIOST, BSPE98745-10195-3, 180 p
- KIOST (2015) Development of marine ecosystem health index in the special management areas of the south sea. KIOST, BSPE99191-10192-3, 159 p
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2000) Designation of environmental protection and special management area. MMAF notification 2000-3, 123 p
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries (2001) Nationwide monitoring of persistent organic pollutants from coastal environment of Korea. BSPM 00070-1336-3, 123 p
- Ministry of Ocean and Fisheries (2013) Guidelines of marine water quality and sediment. MOF notification 2013-186. <http://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=5489&boardKey=35&menuKey=402¤tPageNo=1> Accessed 3 Mar 2016

Received Mar. 21, 2016

Revised Jul. 21, 2016

Accepted Jul. 28, 2016