

노닐페놀류와 분변계스테롤을 이용한 부산연안 퇴적물의 하수 오염도 평가

최민규[†] · 이인석 · 황동운 · 윤세라 · 정래홍

국립수산과학원 기반연구부 어장환경과

Evaluation of Sewage Pollution by Sedimentary Nonylphenolic Compounds and Fecal Sterols in Busan Coastal Area of Korea

Minkyu Choi[†], In-Seok Lee, Dong-Woon Hwang, Sera Yoon, and Rae-Hong Jung

Marine Environment Research Division, National Fisheries Research and Development Institute (NFRDI),
Busan 619-705, Korea

Received June 9, 2014/Revised June 16, 2014/Accepted June 19, 2014

Surface sediment samples collected from Busan coastal area of Korea were analyzed for molecular markers of organic wastewater compounds, i.e., fecal sterols including coprostanol (COP) and nonylphenolic compounds (NPs), to assess anthropogenic contamination and to characterize the main routes of wastewater to the coast. Concentrations of COP, a marker of municipal wastewater contamination, ranged from 7.61 to 11,684 ng/g dry weight in sediments, while concentrations of NPs (nonylphenol, and nonylphenol mono- and di-ethoxylates), a marker of industrial wastewater contamination, ranged from 50.5 to 2,166 ng/g dry weight in sediments. Their detection in all of the sediments indicates widespread pollution by wastewater. Moreover, relatively high levels of COP and NPs in the present study suggest significant pollution by both urban and industrial wastewater input, compared with previous results. The spatial distribution of COP levels was statistically similar to that of NPs, indicating that these compounds may have similar discharge points, transport, mixing, and deposition in the coastal area. Levels of COP and NPs were much higher at stations close to the ports, and rivers that pass through the urban center of Busan City. These results suggest that considerable amount of wastewater compounds are discharged through direct input, combined sewer overflows, and urban runoff to Busan Harbor.

Key words: Coprostanol, Nonylphenol, Busan harbor, Organic wastewater compounds

1. 서 론

부산항은 1910년 제1부두 축조를 시작으로 단계별 개발공사를 거쳐 현재 국내 최대 무역항으로서 2012년 물동량 17,046 천TEU로 세계 5위의 컨테이너 항만이며,¹⁾ 또한 전국 수산물 유통의 44%를 차지하는 국내 제일의 수산항으로 발전해 왔다. 부산은 2012년 현재 인구 357만명, 사업체 27만개, 환경오염물질 배출사업장(폐수) 2,377개로 우리나라에서 두 번째 큰 도시이다.²⁾ 하지만, 부산항의 산업화와 도시화로 선박 및 육상시설로부터 각종 오염물질 유입, 동천 및 보수천 등의 하천으

로부터 생활하수 유입 등으로 인해, 환경오염이 심한 상황이다. COD(chemical oxygen demand)를 기준으로 했을 때, 부산항 수질은 II 등급 이상이고, 특히 부산항 내측은 III 등급으로 우리나라에서 가장 오염된 항으로 구분된다. 또한, 표층퇴적물내 COD 농도도 북항 및 남항 내측에서 일본 수산용수기준을 초과하고 있으며, 산휘발성황화합물의 농도도 기준치의 약 20배를 초과하는 등 유기물의 심각한 오염도를 보였다.^{3,4)} 2000년, 정부는 부산항 인근 연안의 오염원 관리 및 오염저감을 목적으로 부산연안을 특별관리해역으로 지정하여 관리하고 있다. 하지만, 많은 연구들은 부산항에서 유기물뿐만 아

[†]To whom correspondence should be addressed.

나라 유해물질(중금속, PCBs, 유기주석화합물 등)로 인한 오염을 최근까지도 보고하고 있다.⁵⁻⁸⁾ 국내 연안환경 중 고농도의 오염물질은 다양한 인위적인 활동과 관련이 있으며, 그중 하·폐수가 중요한 배출원 중 하나로 보고된다.^{6,10-12)} 따라서 부산항으로 배출되는 하·폐수의 배출수준 및 경로를 파악하는 것은 매우 중요하다.

최근에는 강이나 해양에서 하·폐수로 인한 오염 평가를 위해 오염지시자(molecular markers)를 많이 이용하고 있다. 이러한 오염지시자중 coprostanol(COP)을 포함한 분변계스테롤(fecal sterols)과 노닐페놀류(nonylphenolic compounds)가 많이 이용되고 있다.^{6,13-17)} 이들은 하·폐수에서 다량 존재하고 독특한 배출특성(source specificity)을 가지고 있어 하·폐수 오염평가가 많은 정보를 제공한다. 노닐페놀류는 비이온계면활성제(nonionic surfactants)로 1940년대 이후로 가정/산업용 세제 및 산업공정에 널리 사용되었다. 하지만, 노닐페놀류의 유해성으로 인해 가정용으로 사용을 규제하였으며, 국내에서도 2007년부터 가정용으로 사용이 전면 금지되었다.¹⁸⁾ 노닐페놀류는 산업공단 등 산업화된 지역의 배출수 중 높은 농도로 검출되고 있어 산업폐수에 대한 좋은 오염지시자로 사용되고 있다.^{6,13,14)} 분변계스테롤 중 COP은 포유류의 장에서 cholesterol로부터 생성되는 주요한 분변계스테롤로서, 인간이 배설하는 분변계스테롤 중 50~80%를 차지하며, 다른 포유류보다 약 5배 이상 많

이 포함한다.¹⁹⁾ 인간과 다른 동물들(가축, 조류, 해양생물)의 배설물 내 분변계스테롤 분포도 매우 상이하기 때문에, 이들 분포와 비율 등은 배출원을 구분하는데 유용하게 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 두 번째 큰 도시이며, 가장 큰 항만시설을 갖춘 부산연안에서 해양퇴적물내 노닐페놀류와 분변계스테롤을 분석하여 하·폐수로 인한 오염 현황과 오염경로를 파악하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

부산연안 퇴적물은 2007년 2월에 부산 북항, 남항, 감천항, 다대포항을 중심으로 31개 정점(부산 북항 12개 정점, 남항 8개 정점, 감천항 7개 정점, 다대포항 4개 정점)에서 채취하였다(Fig. 1). 퇴적물 시료는 van Veen grab sampler를 이용하여 표층(< 4 cm)을 채취하였으며, 채취된 퇴적물은 조사선에서 냉동하여 실험실로 운반하였다. 퇴적물 시료는 동결건조하고 분쇄하여 2 mm 체로 걸러 갈색병(amber bottle)에 보관하였다.

2.2. 분석방법

노닐페놀류와 분변계스테롤의 분석은 Choi et al.^{6,14)}의 분석방법과 동일하게 수행하였다. 노닐페놀류의 분석

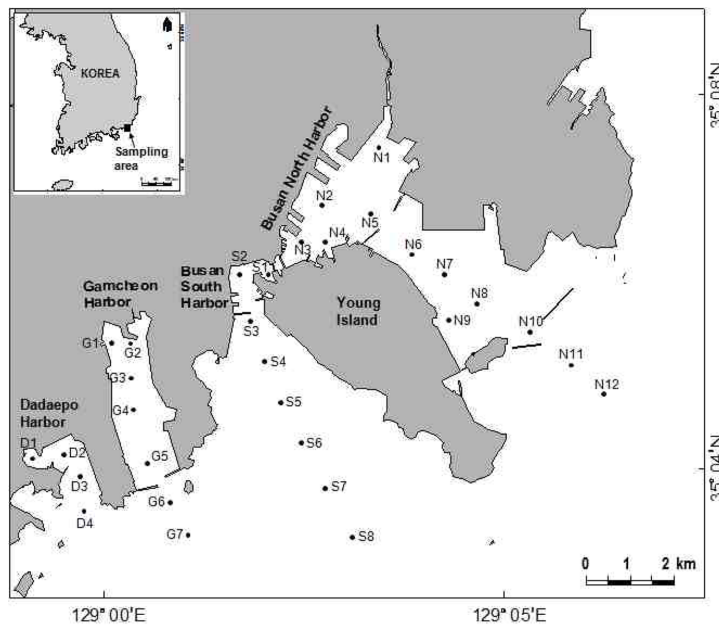


Fig. 1. Sampling locations of marine sediments in Busan coastal area, Korea.

대상성분은 nonylphenol (NP), nonylphenol mono- & di-ethoxylates (NP₁₊₂EO)이며, 분변계 스테롤은 COP, cholestanol (CHOA), epicoprostanol, cholesterol, campesterol, stigmasterol, stigmastanol, β -sitosterol, brassicasterol로 구성된다. 노닐페놀류의 분석방법을 요약하면, 다음과 같다. 동결건조된 퇴적물 약 5 g을 테프론 원심분리관에 넣은 후, 내부표준물질 nonylphenol-¹³C₆ (Cambridge Isotope Laboratories)을 주입하고, methylene chloride (J.T. Baker, 잔류농약급)을 이용하여 2회 진탕 추출하였다. 추출액은 1 mL까지 질소농축한 후, 활성된 구리(Sigma-Aldrich)를 이용하여 황화합물을 제거하였다. 추출액은 99:1 bis (trimethylsilyl) trifluoroacetamide-trimethylchlorosilane (Sigma-Aldrich)를 이용하여 유도체화한 후, Florisil 컬럼(1 g, 60-100 mesh, Sigma-Aldrich)을 이용하여 방해물질을 제거하였고, 질소농축하여 정량용 시료액으로 사용하였다.

분변계스테롤의 분석을 위해 동결건조된 퇴적물 약 5 g을 테프론 원심분리관에 내부표준물질 1-nonadecanol (Dr. Theodor Schuchardt & Co.)과 추출용매 1:1 methylene chloride-chloroform (J.T. Baker, 잔류농약급)을 함께 넣고 2회 진탕 추출하였다. 추출액은 질소농축 후, Florisil 컬럼(10 g)을 이용하여 방해물질을 제거하였고, 정제된 시료액은 질소농축 후, 99:1 bis (trimethylsilyl) trifluoroacetamide-trimethylchlorosilane를 주입하여 유도체화하여 정량용 시료액으로 사용하였다. 정량용 시료액은 gas chromatograph-mass selective detector (Agilent 6890/5973N)로 정량하였다.

분석대상성분의 검출한계(limit of detection)는 signal-to-noise ratio의 3배로 계산하였고, 노닐페놀류의 검출한계는 1-4 ng/g dw(dry weight, 건중량), 분변계스테롤은

4-14 ng/g dw이었다. 회수율(recovery)은 5개의 sea sand(washed sea sand; Fisher Scientific)에 2종 노닐페놀류과 9종 분변계스테롤 표준용액을 spike하여 동일한 전처리방법을 거친 후 계산하였다. 노닐페놀류의 평균회수율은 104±15%, 분변계스테롤의 평균회수율은 77±14%이었다. 실제 퇴적물시료에서 내부표준물질 nonylphenol-¹³C₆ 및 1-nonadecanol의 회수율은 각각 93±17%, 84±22%로 양호한 수준이었다.

2.3. 총유기탄소(Total organic carbon) 분석

퇴적물 내 총유기탄소(TOC)의 함량은 1 N HCl (Merck)을 이용하여 calcium carbonate를 제거 후, 원소분석기(Perkin Emler, Model 2400)로 정량하였다.¹⁴⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 농도범위 및 공간분포

31개 정점(부산 북항, 남항, 감천항, 다대포항)의 퇴적물내 Σ NP(NP와 NP₁₊₂EO의 합) 농도는 50.0-2,166 ng/g dw의 범위로 모든 시료에서 검출되었다(Table 1). COP(대표적인 분변계스테롤)의 농도는 7.61-11,684 ng/g dw의 범위를 보였다. Writer et al.²⁰⁾는 COP 농도가 100 ng/g dw 이상일 때 하수유입과 양(positive)의 상관성이 있다고 제안하였다. 본 연구에서는 31개 정점 중 27개 정점이 100 ng/g dw를 초과하여 부산연안이 하수로 인해 광역적으로 오염되었음을 알 수 있다.

Σ NP의 평균농도는 부산 북항>감천항>부산 남항>다대포항 순으로, 부산 북항이 노닐페놀류로 인한 오염이 가장 심하였고, 다음은 감천항이었다. 반면, COP의 평균농도는 부산 북항>부산 남항>다대포항, 감천항순

Table 1. Summary on concentrations (ng/g dw) of nonylphenolic compounds and fecal sterols in sediments from Busan coastal area of Korea

		NP	NP ₁₊₂ EO	Σ NP	COP	CHOA	COP/(COP+CHOA)	TOC (%)
North H.	Range	16.4-620	26.7-1547	50.0-2166	7.61-11684	ND-13125	0.15-0.75	0.59-1.91
	Mean	149	313	462	1567	2414	0.48	1.20
South H.	Range	21.8-235	25.7-323	52.2-558	71.9-3022	278-8587	0.23-0.70	0.07-2.81
	Mean	62.9	114	177	540	1667	0.43	0.86
Gamcheon H.	Range	30.3-110	38.7-304	83.4-414	130-759	502-2013	0.25-0.51	0.63-1.87
	Mean	69.2	186	256	430	1225	0.36	1.22
Dadaepo H.	Range	22.6-35.2	43.0-80.1	65.6-113	138-1079	384-967	0.37-0.66	0.61-1.08
	Mean	29.6	56.3	85.9	467	726	0.47	0.86

Nonylphenol (NP), nonylphenol mono- & di-ethoxylates (NP₁₊₂EO), the sum of NP and NP₁₊₂EO (Σ NP), coprostanol (COP), cholestanol (CHOA), total organic carbon (TOC).

으로, 부산 북항이 분변계스테롤로 인한 오염이 가장 심하였고, 다음은 부산 남항이었다. 따라서 노닐페놀류와 분변계스테롤을 이용하여 하수오염도를 평가했을 때, 부산 북항이 하수(산업폐수, 생활하수)로 인한 오염이 가장 심하였다. 부산 북항 퇴적물의 오염은 최와 이⁷⁾, 이 등⁸⁾의 연구결과와도 일치하는 것으로, 북항 퇴적물내 유기물과 중금속 농도는 미국환경보호청(USEPA)의 오대호 퇴적물기준과 비교했을 때, 심각영향수준으로 분류되었고, 부산도심 14개 하천의 퇴적물중 북항으로 유입하는 구덕천 등에서 COD, 유기탄소함량, 강열감량은 다른 하천에 비해 2-50배가량 높은 것으로 보고되었다.

ΣNP와 COP 농도는 항별로 차이가 있었지만, 항 내 측 정점에서 가장 높은 농도가 조사되었고, 외측으로 갈수록 농도가 낮아지는 것을 볼 수 있다(Fig. 2a, 2b). ΣNP의 공간적 분포는 COP의 분포와 잘 일치하였다

($r=0.769$, $p<0.01$). ΣNP와 COP의 최고농도는 동천이 유입하는 정점 N1에서 조사되었다. 또한 남항의 보수천 등 하천이 유입하는 정점들에서 이들 성분의 높은 농도가 조사되었다. 부산지역은 낮은 하수관거보급율(48%), 우수관거보급율(9.3%) 또는 하수관거월류수(combined sewer overflows)에 대한 관리의 미흡이 원인 것으로 판단된다.²¹⁾ 특히, 동천은 모두 부산 도심을 통과하고 넓은 유역면적을 가지고 있어 북항의 수질에 큰 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다.²²⁾

ΣNP와 COP는 퇴적물내 TOC 농도와도 유의한 상관성을 보였지만, 상관계수는 높지 않았다($r=0.429-0.437$, $p<0.05$). 이것은 부산연안에서 ΣNP와 COP의 분포에 오염원의 직접적인 영향(local contaminant sources)이 높게 기여했기 때문으로 판단된다.¹⁴⁾

퇴적물 내 존재하는 CHOA의 농도는 인간과 가축의

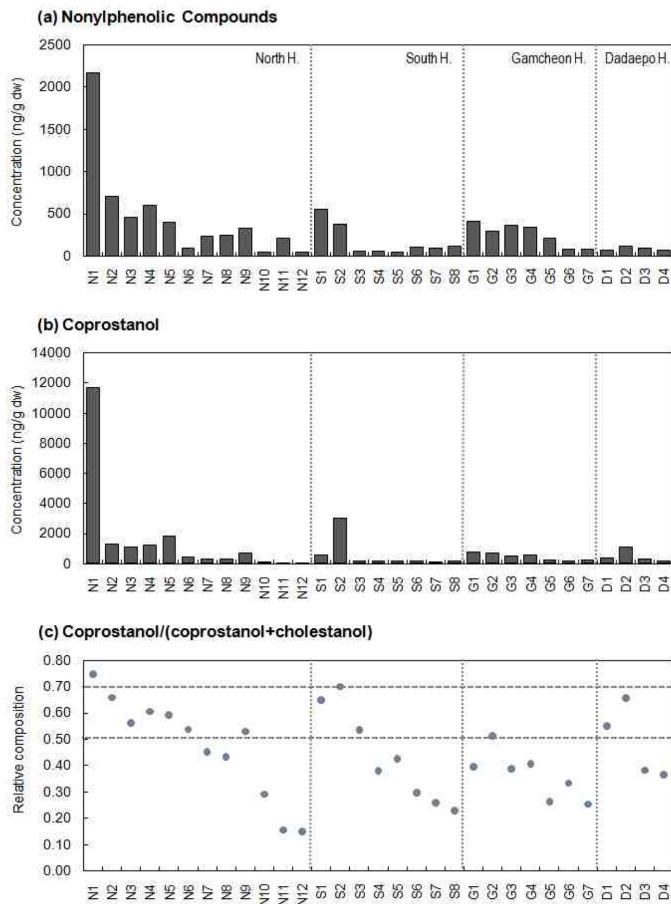


Fig. 2. Spatial distribution of nonylphenolic compounds (the sum of nonylphenol and nonylphenolic mono- & diethoxylates), coprostanol, and coprostanol/(coprostanol+cholestanol) ratios in sediments from Busan coastal area of Korea.

배설물 유입 또는 미생물의 환원에 의해 퇴적물 내 cholesterol이 CHOA로 전환작용이 클 때 증가한다.^{23,24} 따라서 생활하수 오염원에서 멀어질수록 COP에 비해 CHOA농도가 상대적으로 증가하게 된다. COP/(COP +CHOA)을 이용하면, 생활하수의 오염원에 대한 평가가 가능하다. 본 연구에서 비율 값들은 Fig. 2c에 나타내었으며, 가장 높은 값들은 항 내측에서 조사되었고, 외측으로 갈수록 낮아졌다. 이것은 항 내측에 생활하수의 오염원이 존재함을 의미한다. 또한 비율이 0.7이상(배설물에서 이상적인 값)²⁰을 보이는 정점은 부산 북항 정점 N1과 남항 정점 S2에서 조사되었고, 하수오염의 영향을 의미하는 0.5 이상의 값도 부산 북항 6개 정점, 남항 2개 정점, 감천항 1개 정점, 다대포항 2개 정점에서 조사되었다. 따라서 부산 북항은 생활하수로 인한 오염이 만연해 있음을 알 수 있다.

3.2. 오염원 평가

노닐페놀류와 분변계스테롤의 분포에 따른 오염원과 영향범위를 더 명확히 추정하기 위해 다변량 통계분석을 이용하였다. 이번 연구의 부산연안 자료들을 로그변환 후 대응분석(correspondence analysis)을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 전체분산에 두 축의 설명률은 82%(제 1축 61.3%와 제 2축 20.2%)로 두 축은 주어진 자료를 잘 설명하고 있다. 퇴적물내 2종의 노닐페놀류와 9종 분변계스테롤은 3개(A, B, C)의 그룹으로 구분되었다(Fig. 3a): (A)그룹은 COP, CHOA, epicoprostanol, cholesterol(C₂₇ 분변계스테롤)로 구성되

어 분변과 생활하수오염과 직접 관련이 있다. (B) 그룹은 노닐페놀류(NP와 NP₁₊₂EO)로 구성되었고, 이들은 산업폐수 오염과 관련이 있다. (C)그룹은 stigmasterol, stigmastanol, campesterol, β-sitosterol, brassasterol (C₂₈과 C₂₉ 분변계스테롤)로 구성되었다. C₂₈과 C₂₉ 분변계스테롤은 자연기원, 특히, 해양생물기원과 관련이 있다. Campesterol, stigmasterol, 및 β-sitosterol은 해양의 다양한 조류와 높은 관련성으로 해양생물지시자로 제안되었다.^{15,25} 또한 최 등²⁶은 진해만 퇴적물내 색소(pigment)와 stigmasterol, β-sitosterol 간의 높은 상관성으로 stigmasterol와 β-sitosterol가 식물플랑크톤과 같은 해양생물에서 기원하였음을 밝힌 바 있다.

Fig. 3b는 여러 기원들의 영향들을 고려한 조사정점의 특징을 나타내었다. 조사정점들은 각 기원들의 축에 근접할수록 그 기원의 영향을 상대적으로 많이 받음을 의미한다. 따라서 제 1축을 기준으로 음의 값으로 갈수록 생활하수 및 산업폐수의 오염이 증가하고, 양의 값으로 갈수록 해양생물기원이 증가하고 오염이 감소하는 것을 나타낸다. 부가적으로 제 2축을 기준으로 양의 값으로 갈수록 산업폐수의 오염, 음의 값으로 갈수록 생활하수의 오염이 증가한다. 생활하수 및 산업폐수에 의한 영향이 가장 심한 정점은 북항 N1정점이었으며, 그 주변인 N2, N3, N4, N5도 영향이 미치고 있는 것으로 나타났다. 반면, 남항도 생활하수와 산업폐수의 오염이 크게 나타났으며, S1은 산업폐수의 오염, S2는 생활하수의 오염이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 남항과 북항에서 퇴적물의 유기물과 중금속 오염은 이미 보

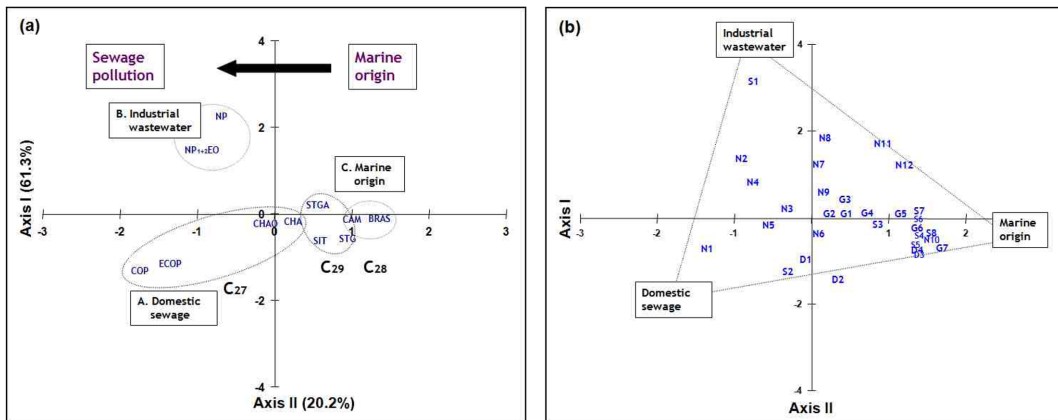


Fig. 3. Correspondence analysis plot for (a) loadings and (b) scores according to composition and concentration of nonylphenolic compounds and fecal sterols in each station in Busan coastal area. COP (coprostanol), ECOP (epicoprostanol), CHA (cholesterol), CHO (cholestanol), CAM (campesterol), STG (stigmasterol), STGA (stigmastanol), SIT (β-sitosterol), and BRAS (brassasterol).

고된 바 있다.^{7,8)} 해양생물 기원이 높고 오염도가 가장 낮은 정점은 각 항들의 외측 정점들, S5-S8, N10, G6, D3, D4이었다. 따라서 생활하수 및 산업폐수로 인한 오염은 북항과 남항 내측에 축적되어 있었고, 외측은 낮은 오염도와 해양생물기원 특성을 보였다.

3.3. 다른 해역과 농도비교

부산연안의 노닐페놀류(산업폐수 기원)와 분변계스테롤(생활하수 기원)로 인한 오염수준을 파악하기 위해 국내외 오염된 해역에서 조사한 NP 및 COP의 결과와 비교하였다(Table 2와 3). 부산연안에서 NP는 16-620 ng/g dw로, 목포연안(최대값 580 ng/g dw)²⁷⁾와 마산만(최대값 600 ng/g dw)¹³⁾와 유사한 수준이었다. 군산연안(2170 ng/g dw)¹⁷⁾은 부산연안보다 2배 정도 높은 수준이었고, 시화호(5050 ng/g dw)^{14,28)}와 울산만(5770 ng/g

dw)²⁹⁾은 부산연안보다 약 10배 정도 높은 수준이었다. 그리고 산업단지 배출수를 받는 강이나 해역에서 농도는 부산연안보다 20-100 배정도 높은 수준이었다. 따라서 부산연안에서 노닐페놀류의 오염은 국내 특별관리해역(마산만, 울산만, 시화호)과 산업화된 연안(목포, 군산)의 결과와 유사하거나 낮은 수준이었고, 산업단지 배출수를 받는 강이나 해역보다 매우 낮은 수준이었다.

부산연안에서 COP농도는 8-11,680 ng/g dw로 산업적으로 발달되어 산업폐수와 생활하수의 유입이 많은 한강하구(최대값 3,100 ng/g dw),³⁰⁾ 울산만(8260 ng/g dw),³¹⁾ 마산만(1,310 ng/g dw),¹³⁾ 시화호(2,200 ng/g dw),¹⁴⁾ 목포연안(7,900 ng/g dw),²⁷⁾ 군산연안(245 ng/g dw),¹⁷⁾ 가막만(600 ng/g dw)¹⁶⁾보다 높은 오염수준을 보였다. 또한, 부산은 일본, 중국, 홍콩, 브라질, 칠레보다 높은 수준이었다. 따라서 부산연안에서 생활하수로

Table 2. Levels (ng/g dw) of nonylphenol in sediments in comparison with other areas

Location	Nonylphenol	Reference
Busan Harbor, Korea	16-620	This study
Mokpo coast, Korea	4-580	Choi et al. ²⁷⁾
Masan Bay, Korea	90-600	Li et al. ¹³⁾
Kyeonggi Bay, Korea	5-1,100	Li et al. ³²⁾
Gusan coast, Korea	21-2,170	Lee et al. ¹⁷⁾
Lake Shihwa, Korea	16-5,050	Li et al. ²⁸⁾ , Choi et al. ¹⁴⁾
Ulsan Bay, Korea	13-5,770	최 등 ²⁹⁾
Nakdong River, Korea	ND-56,700	김 등 ³³⁾
STPs in the world	<5-12,400	Hale et al. ³⁴⁾
Federal aerospace research facilities	<5-14,100	Hale et al. ³⁴⁾
Military shipyards	<5-1,650	Hale et al. ³⁴⁾
Civilian shipyards	<5-5,260	Hale et al. ³⁴⁾

Table 3. Levels (ng/g dw) of coprostanol in sediments in comparison with other areas

Location	Coprostanol	References
Busan Harbor, Korea	8-11,680	This study
Ulsan Bay, Korea	141-8,260	최 등 ³¹⁾
Masan Bay, Korea	31-1,310	Li et al. ¹³⁾
Mokpo coast, Korea	43-7,900	Choi et al. ²⁷⁾
Jinhae Bay, Korea	76-3,960	최 등 ²⁶⁾
Han River, Estuary, Korea	240-3,100	Hyun et al. ³⁰⁾
Lake Shihwa, Korea	30-2,200	Choi et al. ¹⁴⁾
Kyeonggi Bay, Korea	3-3,800	Li et al. ³²⁾
Gamak Bay, Korea	13-600	Kim et al. ¹⁶⁾
Gunsan Coast, Korea	8-245	Lee et al. ¹⁷⁾
Tokyo Bay, Japan	48-240	Chaloux et al. ³⁵⁾
Southeastern water of Hong Kong	390-4,800	Jeng et al. ³⁶⁾
Macao Estuary, China	ND-920	Peng et al. ³⁷⁾
So Paulo Estuary, Brazil	410-4,360	Campos et al. ³⁸⁾
San Vicente Bay, Chile	ND-7,300	Mudge and Seguel ³⁹⁾

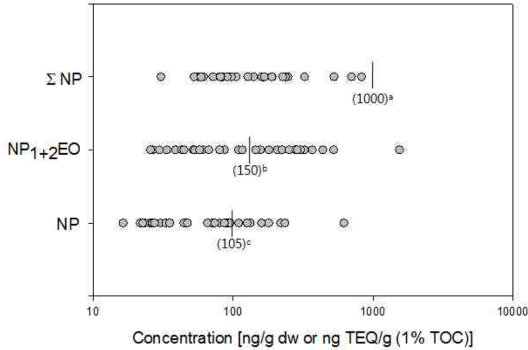


Fig. 4. Concentrations of nonylphenolic compounds in Busan coastal area with comparison of screening values reported elsewhere. ^asediment quality guideline in Canada⁴¹⁾; ^bmaximum permission concentration (MPC) for NP₁₊₂EO, and ^cMPC for nonylphenol in the Netherlands.⁴²⁾

인한 오염은 국내에서 가장 높은 수준이었고, 외국과 비교에서도 상당히 높은 수준이었다. 이러한 결과는 부산연안이 산업폐수로 인한 오염보다 생활하수로 인한 오염도가 더 높은 것을 의미한다.

3.4. 외국기준과 비교

미량의 노닐페놀류는 수생물중에 만성독성과 내분비계를 교란하는 등 수생태계에 악영향을 미치는 것으로 보고된다.⁴⁰⁾ 캐나다와 네덜란드는 노닐페놀류로부터 수생물종을 보호하기 위해 퇴적물 가이드라인을 제안하였다.^{41,42)} 캐나다와 네덜란드의 가이드라인과 비교하여 퇴적물 내 노닐페놀류의 잔류로 인한 위해도를 평가하였다(Fig. 4). 이때 퇴적물 중 ΣNP [ng NP-TEQ/g dw (TOC 1%)] 농도계산은 기존 농도에 독성등가계수(toxic equivalency factor; NP 1.0, NP₁₊₂EO 0.5)를 곱하여 합한 후 TOC 1%로 표준화하였다.⁴¹⁾ 본 연구에서 ΣNP 농도범위는 30.5-830 ng NP-TEQ/g dw (TOC 1%)이었으며, 캐나다의 가이드라인[1000 ng NP-TEQ/g dw (TOC 1%)]을 초과하는 정점은 조사되지 않았다. 하지만, 네덜란드의 가이드라인(NP 105 ng/g dw, NP₁₊₂EO 150 ng/g dw)과 비교할 때, NP 가이드라인을 초과한 정점은 26%(8개 정점; N1, N3, N4, N5, N8, N9, S1, G1)나 되었고, NP₁₊₂EO 가이드라인을 초과한 정점은 42%(13개 정점; N1-N5, N7, N9, S1, S2, G1-G4)나 되었다. 따라서 부산항 내측 퇴적물에서 노닐페놀류의 농도는 수생태계에 서식하는 민감한 수생물종에게 잠재적인 악영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

부산항(부산 북항, 남항, 감천항, 다대포항)에서 31개 퇴적물 내 노닐페놀류와 분변계스테롤을 분석한 결과, ΣNP 농도는 50.0-2,166 ng/g dw의 범위를 보였고, 네덜란드 가이드라인(NP, NP₁₊₂EO)을 초과하는 농도는 8-13개 정점에서 조사되었다. COP 농도는 7.61-11,684 ng/g dw의 범위를 보였고, 100 ng/g dw를 초과한 농도는 27개 정점에서 조사되었다. 부산연안에서 노닐페놀류의 오염은 국내 특별관리해역(마산만, 울산만, 시화호)과 산업화된 연안(목포, 군산)의 결과와 유사하거나 낮은 수준이었고, 산업단지 배출수를 받는 강이나 해역보다 매우 낮은 수준이었다. 반면 부산연안에서 분변계스테롤로 인한 오염은 국내에서 가장 높은 수준이었고, 외국과 비교에서도 높은 수준이었다. 따라서 부산연안은 산업폐수로 인한 오염보다 생활하수로 인한 오염도가 더 높았다.

부산연안의 공간분포를 살펴보면, 노닐페놀류와 분변계스테롤의 평균농도는 부산 북항이 다른 항보다 훨씬 높은 값을 보였다. 노닐페놀류와 COP의 최고농도는 모두 부산 도심을 통과하고 넓은 유역면적을 가지는 동천이 유입하는 북항 정점 N1에서 조사되었다. COP/(COP+CHOA)을 이용하여 생활하수의 오염원에 대한 평가한 결과, 0.5 이상의 값은 부산 북항 7개 정점, 남항 3개 정점, 감천항 1개 정점, 다대포항 2개 정점에서 조사되었다. 따라서 부산연안, 특히 북항은 생활하수뿐만 아니라 산업폐수로 인한 오염의 최소화를 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립수산과학원(RP-2014-ME-17)의 연구지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 부산항만공사, <http://www.busanpa.com>, 2014년 4월.
2. 부산광역시, <http://www.busan.go.kr>, 2014년 4월.
3. 박영철, 양한섭, 이필용, 김평중, “겨울철 부산항 주변 해역의 수질과 표층퇴적물 환경특성”, *한국수산학회지*, **1995**, 28, 577-588.
4. 이준기, 김석구, 송재홍, 이태운, “부산시 하천퇴적물의 유기 오염도 평가”, *대한환경공학회지*, **2009**, 31, 975-982.
5. S. H. Hong, U. M. Yim, W. J. Shim, J. R. Oh, “Con-

- gener-specific survey for polychlorinated biphenyls in sediments of industrialized bays in Korea: regional characteristics and pollution sources." *Environmental Science Technology*, **2005**, 39, 7380-7388.
6. M. Choi, H. B. Moon, J. Yu, S. S. Kim, A. S. Pait, H. G. Choi, "Nationwide monitoring of nonylphenolic compounds and coprostanol in sediments from Korean coastal waters." *Marine Pollution Bulletin*, **2009**, 58, 1086-1092.
 7. 최보람, 이태윤, "부산항만 퇴적물의 유기물 및 중금속 함량 측정을 통한 퇴적물 오염도 평가", *한국폐기물자원순환학회지*, **2011**, 28, 269-274.
 8. 이태윤, "부산 남항 퇴적물의 오염도 평가 연구", *한국폐기물자원순환학회지*, **2013**, 30, 119-123.
 10. S. Dez, S. Jover, E. Albaigs, J. M. Bayona, "Occurrence and degradation of butyltins and wastewater marker compounds in sediments from Barcelona harbor, Spain." *Environmental International*, **2006**, 32, 858-865.
 11. H. B. Moon, S. P. Yoon, R. H. Jung, M. Choi, "Wastewater treatment plants (WWTPs) as a source of sediment contamination by toxic organic pollutants and fecal sterols in a semi-enclosed bay in Korea." *Chemosphere*, **2008**, 73, 880-889.
 12. M. I. Venkatesan, O. Merino, J. Baek, T. Northrup, Y. Sheng, J. Shisko, "Trace organic contaminants and their sources in surface sediments of Santa Monica Bay, California, USA." *Marine Environmental Research*, **2010**, 69, 350-362.
 13. D. Li, M. Dong, W. J. Shim, U. H. Yim, S. H. Hong, N. Kannan, "Distribution characteristics of nonylphenolic chemicals in Masan Bay environments, Korea." *Chemosphere*, **2008**, 71, 1162-1172.
 14. M. Choi, E. T. Furlong, H. B. Moon, J. Yu, H. G. Choi, "Contamination of nonylphenic compounds in creek water, wastewater treatment plant effluents, and sediments from Lake Shihwa and vicinity, Korea: comparison with fecal pollution." *Chemosphere*, **2011**, 85, 1406-1413.
 15. S. Froehner, R. F. Martins, M. F. Errer, "Assessment of fecal sterols in Barigui River sediments in Curitiba, Brazil." *Environmental Monitoring and Assessment*, **2009**, 157, 591-600.
 16. Y. H. Kim, M. Choi, R. H. Jung, S. P. Yoon, J. Yu, H. G. Choi, S. M. Ahn, H. B. Moon, "Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons and fecal sterols in sediment from Gamak Bay and their impact on benthic community." *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, **2010**, 13, 1-10.
 17. W. S. Lee, M. Choi, D. W. Hwang, I. S. Lee, S. Y. Kim, "Chemical contamination and toxicity of sediments from the Gunsan Coast, Korea." *Fisheries and Aquatic Sciences*, **2012**, 15, 1-10.
 18. 환경부, <http://www.me.go.kr>, 2014년 4월.
 19. R. A. Leeming, A. Ball, N. Ashbolt, P. Nichols, "Using faecal sterols from humans and animals to distinguish faecal pollution in receiving waters." *Water Research*, **1996**, 30, 161-178.
 20. J. H. Writer, J. A. Leenheer, L. B. Barber, G. L. Amy, S. C. Chapra, "Sewage contamination in the upper Mississippi River as measured by the fecal sterol, coprostanol." *Water Research*, **1995**, 29, 1427-1436.
 21. 환경부, "2007년 하수도 통계"(<http://www.me.go.kr>), 환경부 생활하수과, 2011년 12월.
 22. 부산발전연구원, "부산연안 수질환경 실태 분석 및 해양환경 관리방안 연구", 2003, 94.
 23. P. G. Hatcher, P. A. McGillivray, "Sewage contamination in the New York Bight, coprostanol as an indicator." *Environmental Science Technology*, **1979**, 12, 1225-1229.
 24. E. Fattore, R. Benfenati, R. Marelli, E. Cools, R. Faneli, "Sterols in sediment samples from Venice Lagoon, Italy." *Chemosphere*, **1996**, 33, 2382-2393.
 25. J. K. Volkman, S. M. Barrett, S. I. Blackburn, M. P. Mansour, E. L. Sikes, F. Gelin, "Microalgal biomarkers: a review of recent research developments." *Organic Geochemistry*, **1998**, 29, 1163-1179.
 26. 최민규, 문효방, 김상수, 박종수, "퇴적물내 coprostanol을 이용한 진해만의 도시하수오염 평가", *한국수산학회지*, **2005**, 38, 118-128.
 27. M. Choi, H. G. Choi, H. B. Moon, J. Yu, S. K. Kang, S. K. Choi, "Sources and distributions of organic wastewater compounds on the Mokpo coast of Korea." *Journal of Fisheries Science and Technology*, **2007**, 10, 205-214.
 28. Z. Li, D. Li, J. R. Oh, J. G. Je, "Seasonal and spatial distribution of nonylphenol in Shihwa Lake, Korea." *Chemosphere*, **2004**, 56, 611-618.
 29. M. Choi, H. B. Moon, H. G. Choi, "Tracing wastewater contamination in sediments from Ulsan Bay of Korea using nonylphenolic compounds." *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, **2011**, 14, 5-11.
 30. J. H. Hyun, S. J. Ju, H. R. Harvey, "Fecal contamination associated with local reclamation activity in the Han River estuary." *Journal of Korean Society for Oceanography*, **2002**, 37, 224-231.
 31. 최민규, 최희구, 김상수, 문효방, "Fecal sterol을 이용한 울산만과 주변해역 퇴적물내 하수기인 유기물 평가", *한국환경과학회지*, **2005**, 14, 23-32.
 32. D. Li, W. J. Shim, M. Dong, S. H. Hong, "Application

- of nonylphenol and coprostanol to identification of industrial and fecal pollution in Korea.” *Marine Pollution Bulletin*, **2007**, 54, 97-116.
33. 김성철, 박청길, 조현서, 이대인, “낙동강 퇴적물의 Nonylphenol과 Bisphenol A 오염도 평가”. *한국물환경학회지*, **2003**, 19, 357-366.
 34. R. C. Hale, C. L. Smith, P. O. De Fur, E. Harvey, E. O. Bush, M. J. La Guardia, G. G. Vadas, “Nonylphenols in sediments and effluents associated with diverse wastewater outfalls.” *Environmental Toxicology and Chemistry*, **2000**, 19, 946-952.
 35. N. Chalaux, H. Takada, J. M. Bayona, “Molecular markers in Tokyo Bay sediments: sources and distribution.” *Marine Environmental Research*, **1995**, 40, 77-92.
 36. W. Jeng, J. Wang, B. Han, “Coprostanol distribution in marine sediments off southwestern Taiwan.” *Environmental Pollution*, **1996**, 94, 47-52.
 37. X. Peng, G. Zhang, B. Mai, Y. Min, Z. Wang, “Spatial and temporal trend of sewage pollution indicated by coprostanol in Macao Estuary, southern China.” *Marine Pollution Bulletin*, **2002**, 45, 295-299.
 38. V. Campos, R. Fraccio, L. F. Fraceo, A. H. Rosa, “Fecal sterols in estuarine sediments as markers of sewage contamination in the Cubato area, So Paulo, Brazil.” *Aquatic Geochemistry*, **2012**, 18, 433-443.
 39. S. M. Mudge, C. G. Seguel, “Organic contamination of San Vicente Bay, Chile.” *Marine Pollution Bulletin*, **1999**, 38, 1011-1021.
 40. A. Soares, B. Guieysse, B. Jefferson, E. Cartmell, J. N. Lester, “Nonylphenol in the environment: a critical review on occurrence, fate, toxicity and treatment in wastewaters.” *Environmental International*, **2008**, 34, 1033-1049.
 41. Environment Canada, “Canadian Environmental Quality Guidelines for nonylphenol and its ethoxylates (water, sediment, and soil) for the protection of aquatic life: nonylphenol and its ethoxylates.” **2002**, National guidelines and standards office, Environmental Quality Branch, Environment Canada, Report 1-3, Ottawa, Canada.
 42. N. Jonkers, R. W. Laane, C. de Graaf, P. De Voogt, “Fate modeling of nonylphenol ethoxylates and their metabolites in the Dutch Scheldt and Rhine estuaries: Validation with new field data.” *Estuarine Coastal and Shelf Science*, **2005**, 62, 141-160.