

연구논문

부산지역 사업장 폐수 알킬페놀류의 배출 특성 및 수생태계 위해성 평가

구서연 · 최성화[†] · 박양진 · 유숙진 · 정재은

부산광역시 보건환경연구원

Discharge Characteristics of Alkylphenols in Industrial Wastewater and Ecological Risk Assessment in Busan, Korea

Seo-Yeon Gu, Seoung-Hwa Choi[†], Yang-Jin Park, Sook-Jin You, and Jae-Eun Jeong

Department of Water Environment Research, Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment, Busan 46616, Korea

Received September 24, 2025 / Revised November 11, 2025 / Accepted December 03, 2025

This study presents the first comprehensive assessment of discharge characteristics and ecological risks associated with alkylphenols, specifically nonylphenol (NP) and octylphenol (OP), in industrial wastewater across Busan, Korea. A total of 146 samples were analyzed revealing detection frequencies of 18% for NP and 54% of OP. Higher concentrations of both compounds were predominantly observed in wastewater in effluents from steel and metal processing (NP: ND[not detected] to 21.838 µg/L, OP: ND to 206.053 µg/L) and repair and car wash facilities (NP: ND to 54.039 µg/L, OP: ND to 60.564 µg/L). The OP concentrations were significantly higher than those of NP, suggesting its growing use as a replacement for NP following the stricter regulatory controls on NP. Hazard quotient (HQ) calculations revealed that NP exceeded the high-risk threshold (HQ≥1) in 4.1% of the samples, whereas OP surpassed this threshold in 28.1% of samples, underscoring its greater potential for environmental harm. Despite average removal efficiencies of 94% NP and 80% for OP in public sewage treatment plants, the persistence and ecological relevance of these compounds remain concerning. The findings emphasize the need for targeted monitoring and mitigation strategies to address alkylphenols contamination in industrial effluent.

Key words: Nonylphenol, Octylphenol, Industrial wastewater, Risk assessment, Removal efficiency

1. 서 론

알킬페놀 에톡실레이트(Alkylphenol ethoxylate, APEOs)는 계면활성제의 한 종류로, 유화제, 안정제, 습윤제, 분산제, 세정제 등으로 광범위하게 사용되어왔다. 가장 일반적으로 활용되는 상업용 APEOs는 노닐페놀 에톡실레이트(Nonylphenol ethoxylate, NPEO)와 옥틸페놀 에톡실레이트(Octylphenol ethoxylate, OPEO)로, 주로 펄프 및 제지 생산, 섬유 제조, 페인트 및 코팅제 생산, 농약 제조 등 다양한 산업 분야에서 사용되며, 일부는 가정용 및 산업용 세정 제품에도 활용된다. APEOs는 환경 중에서 Ethoxylate 작용기가 미생물 분해 과정을 통해 독성이 더 강한 산물인 노닐페놀(Nonylphenol, NP), 옥틸페놀

(Octylphenol, OP)로 쉽게 분해되며, 이러한 알킬페놀류들은 주로 에스트로겐 수용체 상호작용과 안티 안드로겐 작용으로 남성의 발기부전·무정자증, 여성의 기형아 출산·성조숙증 등의 내분비계 장애를 일으킨다.¹⁾

유럽연합(European Union, EU)에서는 2003년부터 수생태계 보호와 인체 위해 방지를 위해 노닐페놀 에톡실레이트와 노닐페놀의 산업용 세정제 및 섬유·가죽 가공 용도를 모두 규제하고 있으며, 국내에서는 2001년에 『유해화학물질관리법』에서 노닐페놀을 유독물로 지정하였다. 2006년부터 『유독물질 및 제한물질·금지물질의 지정 고시』를 기반으로 노닐페놀이 0.1% 이상 함유된 혼합물에 대하여 가정용 세척제, 잉크, 페인트의 용도로 제조, 수입, 판매, 보관, 저장, 운반, 사용을 금지하였으며,

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 051-309-2943, Email: csw95@korea.kr

2016년에는 산업용 세정 및 세척제, 섬유·가죽 가공에 대한 용도 제한을 추가하는 등 규제를 강화하였다. 노닐페놀의 지속적인 규제 강화에 따라 대체물질로 옥틸페놀이 활용되었으나, 노닐페놀과의 구조적 유사성 거동 및 독성을 보여 유럽연합에서 대체제로서의 사용을 규제하기 시작하였다. 현재 유럽연합에서는 수환경기준 노닐페놀과 옥틸페놀 각 0.3, 0.1 µg/L 이하로 제시하고 있으며, 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)은 노닐페놀의 수생태 보호 기준으로 6.6 µg/L 이하를 제시하였다.^{2,3)}

국내에서는 아직 노닐페놀과 옥틸페놀에 대한 수질환경기준이 설정되지 않았으나, 국립환경과학원의 ‘수질오염물질 지정 및 적정 관리방안연구(2020)’에서 청정지역(노닐페놀: 0.01 mg/L, 옥틸페놀: 0.005 mg/L)과 가나·특례 지역(노닐페놀: 0.02 mg/L, 옥틸페놀: 0.01 mg/L)으로 나누어 배출허용기준(안)을 제시한 바 있다. 그러나 배출원에서의 배출 특성 파악을 위한 모니터링 사례와 수생태계 위해성 평가 조사가 절대적으로 부족하여 배출허용기준(안)의 법제화는 어려운 상황이다. 따라서 환경부에서는 국내 모니터링 자료 기반의 배출허용기준 설정을 위하여 2021년부터 사업장폐수 내 노닐페놀과 옥틸페놀을 수질 감시항목으로 지정하여 우선순위 1순위 물질로 관리하고 있다. 이에 따라 각 시도에서는 사업장폐수 방류수를 대상으로 모니터링을 수행하였으며, 경기, 광주, 전남지역 등에서 도금, 철강 및 금속가공, 병원 및 세탁 등 다수의 업종에서 빈번히 검출되고 있음을 확인하였다. 이는 2016년 국내 산업용 세정제 용도 규제 이후에도 노닐페놀과 옥틸페놀은 산업 용도로 여전히 활용되고 있음을 알 수 있다.

노닐페놀과 옥틸페놀의 환경 중 주요 배출원은 사업장폐수 및 하·폐수처리장이며, 처리공법에 따라 제거효율은 33~94% 가량으로 충분한 제거가 이루어지지 않고 있는

실정이다.⁴⁾ 따라서 노닐페놀, 옥틸페놀에 대한 거동 평가를 통한 지속적 모니터링 및 이를 통한 효과적인 관리 방안과 규제치 마련이 필요하다.

이에 본 연구에서는 부산지역 사업장폐수 방류수의 노닐페놀과 옥틸페놀 모니터링을 통해 업종별, 시설규모별 배출특성을 조사하고 환경 유해지수를 산정하여 개별 사업장 방류수가 수생태계에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 또한, 부산지역 내 노닐페놀 및 옥틸페놀의 주요 배출업종(금속가공 제품 제조시설, 세차시설 등)이 다수 위치한 기장 지역을 대상으로 산업폐수를 연계 처리하는 하수처리장의 유입수와 방류수 모니터링을 통하여 노닐페놀과 옥틸페놀의 처리효율 및 방류수로 인한 하천 오염 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상 및 기간

본 연구에서는 2022년 7월부터 2023년 12월까지 부산시 16개 구군 중 12개 구군의 폐수 배출 사업장에서 146개의 방류수를 채취하여 부산지역 업종별 배출특성과 하천 방류에 따른 수생태 위해성을 파악하고자 하였다. 사업장폐수 방류수 시료는 물환경보전법에 따라 배출 규모별로 1종에서 5종까지 나뉘며, 1종 사업장은 식품업이 2건으로 가장 많았고, 2종~4종 사업장은 철강·금속가공, 5종은 세차시설이 가장 많았다. 업종별 구분은 ‘물환경보전법’에서 분류하고 있는 폐수 배출 사업장의 업종에 따라 82종으로 나누어지고 업종별 유사성에 따라 8개의 업종으로 재분류하였다(Table 1).

하수처리장의 경우, 주요 배출업종 밀집지역인 기장군 정관읍에 위치한 A 하수처리장을 선정하였다. A 하수처리장은 공공하수처리시설로, 일일 약 27,000 m³ 처리용량을 갖는 중규모 하수처리장이며, 처리공정은 유입수가

Table 1. Industrial categories of facilities in Busan, Korea

No.	Industrial category	Number of samples
1	Food industry	15
2	Textile and leather processing	2
3	Petrochemicals	12
4	Steel and metal processing	55
5	Electrical and electronics	3
6	Waste disposal	20
7	Repair and car wash	34
8	Other facilities	5
Total		146

침사지를 거친 후 무산소조-포기조-이차침전지-여과지-소독조로 구성되어있다. 해당 하수처리장의 유입수 및 방류수를 2024년 매월(1~10월) 1회(총 10회) 분석하여 노닐페놀과 옥틸페놀의 처리장 내 처리효율을 파악하고자 하였다.

2.2. 시료 채취

시료 채수는 유리병 2L를 사용하였으며, 채수한 시료는 9M H₂SO₄을 가해 pH 2 이하로 조절 후, 추출 전까지 0°C~4°C 냉장소에서 보관하였다.

2.3. 표준물질 및 시약

본 연구에서는 분석에 사용된 Dichloromethane(GC grade)과 Methanol(HPLC grade)을 Merck사의 용매로 사용하였으며, 표준물질로 노닐페놀(Nonylphenol, CAS No. 84852-15-3), 옥틸페놀(Octylphenol, CAS No. 140-66-9), 대체표준물질(4-n-Nonylphenol, CAS No. 104-40-5), 내부표준물질(Phenanthrene-d10, CAS No. 1517-22-2)은 Accustandard사에서 구입하였다. 염화나트륨은 Merck사의 특급 시약을, 무수황산나트륨은 Wako사의 잔류농약시험용 시약을 사용하였다.

2.4. 분석 방법

시료 전처리는 수질오염공정시험기준(ES 04613.1, ES 04614.1)에 따라 진행하였다. 1 L 분액깔때기에 시료 500 mL를 취하고, 대체표준물질(4-n-Nonylphenol, 10 mg/L) 50 µL 및 NaCl 30 g을 첨가하여 용해한 뒤, 디클로로메탄 50 mL로 10분간 액액 추출하였다. 추출된 디클로로메탄 층은 무수황산나트륨으로 여과한 후 동일 과정을 2회 반복하였다. 이후, 수분이 제거된 추출액을 질소농축기로 농축하고 내부표준물질(Phenanthrene-d10, 10 mg/L) 50 µL을 첨가하여 최종 부피를 1.0 mL로 조정 후 기체 크로마토그래피 질량분석기(GC-MS, Agilent 5975C/7890A)를 이용해 분석하였다. 전처리 과정은 Fig. 1에, 분석 조건은 Table 2에 상세히 나타내었다. 노닐페놀과 옥틸페놀은 동시 전처리로 진행되었다.

2.5. 정도관리

검정곡선은 노닐페놀과 옥틸페놀 표준물질 혼합물을 0-10 mg/L 범위로 제조한 후, 시료와 동일한 농도로 대체 표준물질과 내부표준물질을 첨가하여 분석하였다. 노닐페놀은 13개의 이성질체로 구성된 Technical mixture로 NP1~NP13의 피크 지시값(Response)을 합산하여 단일 검

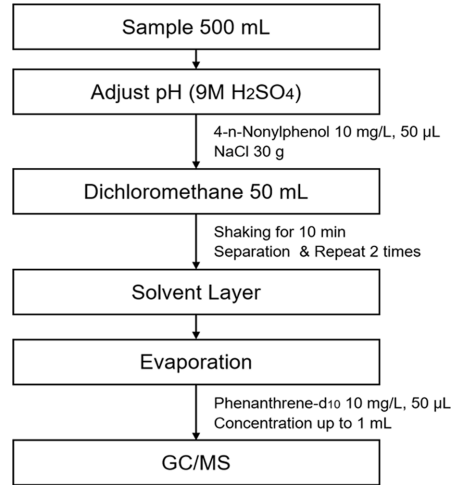


Fig. 1. Analytical procedure of nonylphenol and octylphenol.

정곡선으로 작성하였다. 작성한 검정곡선은 노닐페놀과 옥틸페놀 모두 R²값이 0.99 이상을 만족하였다.

방법검출한계(Method Detection Limit, MDL)는 정량한계 부근의 농도가 되도록 동일하게 표준물질을 첨가한 7개의 시료를 전처리 후 분석하였으며, 분석 결과의 표준편차에 3.14를 곱하여 산출하였으며, 노닐페놀 0.119 µg/L, 옥틸페놀 0.113 µg/L로 산출되었다. 정확도 및 정밀도는 정량한계 부근의 10배 농도의 표준물질을 첨가한 4개의 시료를 전처리 후 분석하여 상대백분율과 상대표준편차(RSD)를 측정하였으며, 정확도는 노닐페놀, 옥틸페놀 각 88.5%, 98.0%, 정밀도는 각 2.2%, 3.0%로 수질공정시험기준에 따른 정도관리 목표를 만족하였다. 정량은 평균 상대감응계수법(RRF_{avg})으로 계산하였으며, 대체표준물질인 4-n-Nonylphenol의 회수율을 구하여 50~120%를 만족하도록 하였다.

2.6. 사업장폐수 방류에 따른 환경 유해지수 산출방법

사업장폐수 방류에 따른 노닐 및 옥틸페놀의 잠재적 수생태계 위해성을 평가하기 위해 『화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정』에 따라 환경 유해지수(Hazard Quotient, HQ)를 식 (1)을 활용하여 산출하였다. 본 연구에서 측정된 사업장폐수 방류수의 농도(Measured Environmental Concentration, MEC_{surface water})를 기반으로 방류수로부터 수역에 완전히 혼합되었을 때를 가정하여 하천 내 예측환경농도(Predicted Environmental Concentration, PEC_{surface water})를 산출하고자 하였다. 이를 위해, MEC_{surface water}에 선행연구에서 제시한 최소 혼합회석 계수(Minimum Dilution Factor, MDF) 값 10을 적

Table 2. Analytical conditions of GC-MS

Parameter	Operating conditions	
Column	HP-5MS-UI (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm)	
Inlet temperature	290°C	
Split ratio	10 : 1	
Column flow	1 mL/min	
Oven temperature	50°C(1 min) → 20°C/min → 160°C(0 min) → 1°C/min → 200°C(2 min) → 30°C/min → 320°C(2 min)	
Phenanthrene-d10(IS)	188	187
4-tert-octylphenol(OP)	135	107
4-(2,4-Dimethylheptan-4-yl) phenol(NP1)	121	107
4-(2,4-Dimethylheptan-2-yl) phenol(NP2)	135	107
4-(3,6-Dimethylheptan-3-yl) phenol(NP3)	149	121
4-(3,5-Dimethylheptan-3-yl) phenol(NP4)	149	121
4-(2,5-Dimethylheptan-2-yl) phenol(NP5)	135	149
4-(3,5-Dimethylheptan-3-yl) phenol(NP6)	149	121
4-(3-Ethyl-2-methylhexan-2-yl) phenol(NP7)	135	107
4-(3,4-Dimethylheptan-4-yl) phenol(NP8)	163	121
4-(3,4-Dimethylheptan-3-yl) phenol(NP9)	149	107
4-(3,4-Dimethylheptan-4-yl) phenol(NP10)	163	135
4-(2,3-Dimethylheptan-2-yl) phenol(NP11)	135	107
4-(3-Methyloctan-3-yl) phenol(NP12)	149	107
4-(3,4-Dimethylheptan-3-yl) phenol(NP13)	135	107
4-n-nonylphenol(SS)	220	107

용하여 식 (2)와 같이 보정하였다.⁵⁾ 산출된 $PEC_{surface\ water}$ 는 수생태계에 유해한 영향이 나타나지 않는 예측무영향 농도(Predicted No Effect Concentration, PNEC)로 나누어 최종적으로 HQ를 계산하였다. 노닐 및 옥틸페놀의 $PNEC_{lowest}$ 값은 유럽연합에서 제시한 수환경기준(Annual average value-environmental quality standards, AA-EQS) 각 0.3 μg/L와 0.1 μg/L을 기준으로 사용하였다.

$$\text{환경유해지수(Hazard Quotient)} = \frac{PEC_{surface\ water}}{PNEC_{lowest}} \quad (1)$$

$$PEC_{surface\ water} = \frac{MEC_{surface\ water}}{MDF} \quad (2)$$

산출된 HQ 값에 대한 분류는 아래와 같으며, 이 중 1 미만의 HQ값은 안전 단계에 해당한다.

- HQ < 0.1 : 낮은 위해성
- 0.1 ≤ HQ < 1 : 중간 위해성
- HQ ≥ 1 : 높은 위해성

2.7. 데이터 분석

본 연구의 통계 분석은 SPSS(Ver 26.0, SPSS Inc.,

IL, USA)를 사용하여 수행하였다. Shapiro-Wilk 검정을 통해 측정 결과가 정규성을 만족하지 않는 것으로 확인 되어, 두 집단 간 농도 비교에는 비모수 검정인 Mann-Whitney U-test를 적용하였다. *p*-value가 0.05 미만인 경우, 통계적 유의미한 차이를 보이는 것으로 해석하였다. 본 연구의 농도 결과는 대부분 불검출 또는 저농도로 나타나 기존의 박스 플롯(Box plot)을 통해서서는 데이터 밀도 및 분포를 표현하기에 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 박스 플롯과 분포와 범위를 동시에 시각화할 수 있는 바이올린 플롯(Violin plot)을 활용하여 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 사업장폐수 방류수에서의 일킬페놀류 검출특성

부산지역 사업장폐수 방류수 146건에 대한 노닐페놀, 옥틸페놀의 분석 결과, 노닐페놀과 옥틸페놀 각각 불검출 -54.039 μg/L(평균: 0.922 μg/L), 불검출-206.053 μg/L(평균: 6.410 μg/L)의 농도를 나타내었다. 또한, 전체 146개의 시료 중 노닐페놀은 18%, 옥틸페놀은 54%의 검출빈도를 보였다. 노닐페놀의 잔류성, 생물축적성 및 인체 건

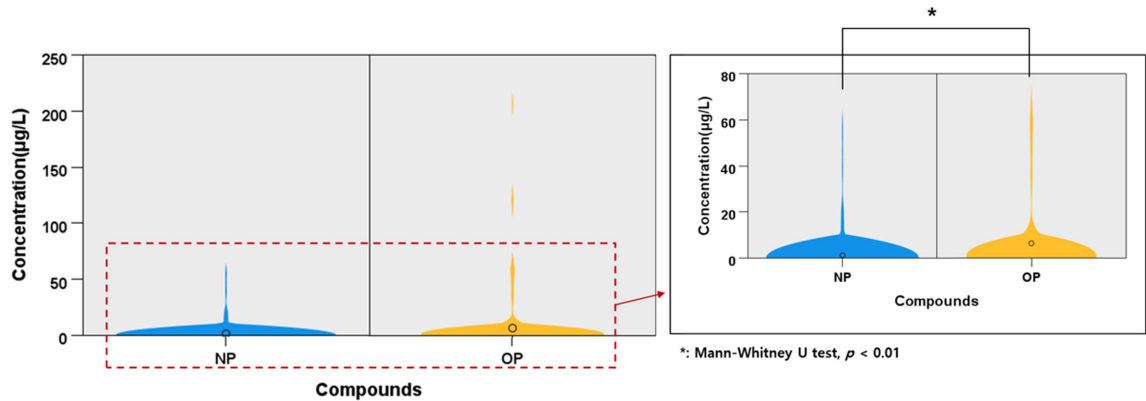


Fig. 2. Concentration of nonylphenol and octylphenol in industrial wastewater samples.

강 우려가 부각되면서 국내에서도 2006년부터 사용을 규제하기 시작하였으나, 여전히 국내 산업에서 일부 활용되고 있는 것으로 예상된다.⁴⁾ 옥틸페놀은 노닐페놀에 비해 상대적으로 높은 농도와 검출빈도를 보였으며, 비모수 검정인 Mann-Whitney U-test를 통해 두 집단 간 유의미한 차이를 보이는 것을 확인하였다($p < 0.01$) (Fig. 2). 옥틸페놀이 노닐페놀과 유사한 물리화학적 성능을 보여 노닐페놀의 대체제로 활용되고 있으며, 국내에서도 노닐페놀에 비해 옥틸페놀의 활용도가 높음을 확인할 수 있다. 알킬페놀류의 지속적 규제 강화로 옥틸페놀 역시 국제적인 규제를 통해 사용이 제한될 가능성이 크기 때문에, 국내에서도 지속적 모니터링을 통한 선제적 관리가 필요하다.

국내 선행연구에서는 노닐페놀과 옥틸페놀의 하천수 모니터링 조사가 이루어졌으며, 한강에서 노닐페놀이 0.023-0.188 µg/L, 갑천 및 미호천에서 0.056-0.920 µg/L, 수영강에서 0.142-0.569 µg/L으로 검출된 바 있다.⁶⁻⁸⁾ 그러나 이들 물질의 산업적 활용성을 고려한 배출원 조사는 이루어지지 않았으며, 2021년 환경부가 수질오염물질 감시 항목으로 추가하면서 국내 사업장 배출원에 대한 조사가 진행되었다.^{4,9-11)} 노닐페놀의 경우, 경기도 남부와 북부의 사업장 방류수에서 각각 2.2-4.08 µg/L, 불검출-19.1 µg/L로 검출되어 본 연구에 비해 다소 낮은 농도를 보였으나, 광주와 전남의 사업장 방류수에서는 0.210-115 µg/L, 불검출-429 µg/L으로 유사하거나 다소 높은 수준으로 검출

Table 3. Industrial categories of facilities in Busan, Korea

Country	Region	Matrix	Concentration(µg/L)		Reference
			Nonylphenol	Octylphenol	
Korea	Busan	Wastewater	ND ^a -54.039	ND-206.053	This study
	Seoul	Freshwater	0.023-0.188	-	Li et al., 2004
	Chungcheong-do	Freshwater	0.056-0.920	-	Lee et al., 2016
	Busan	Freshwater	0.142-0.569	-	Kim et al., 2019
	Gyeonggi-do	Wastewater	2.2-4.08	15.5-235	Seo et al., 2023
	Gwangju	Wastewater	0.210-115	0.193-170	Lee et al., 2023
	Jeonnam	Wastewater	Influent : ND-1,671 Effluent : ND-429	Influent : ND-70.3 Effluent : ND-16.9	Lee et al., 2024
	Gyeonggi-do	Wastewater	ND-19.1	ND-184	Yoon et al., 2024
		Freshwater	0.25-0.35	0.39-0.51	
		Wastewater	Influent : ND-42.6 Effluent : ND-9.65	Influent : ND-1,011 Effluent : ND-7.47	Ryu et al., 2024
Spain	-	Wastewater	6-343	-	Sole et al., 2000
Japan	-	Wastewater	0.08-1.24	0.02-0.48	Isobe et al., 2001
Germany	-	Wastewater	ND-0.77	ND-0.073	Kuch an Ballschmiter, 2001
Iran	-	Wastewater	0.42-2.12	5.35-54.81	B.Bina et al., 2018

^aNot detected

되었다. 옥틸페놀은 경기도 남부에서 15.5-235 µg/L, 북부에서 불검출-184 µg/L, 광주에서 0.193-170 µg/L으로 본 연구와 유사한 수준을 보였으나 전남에서는 불검출-16.9 µg/L으로 다소 낮은 농도를 보였다.

국외의 하·폐수처리장 방류수 중 검출 사례를 보면, 이란(노닐페놀: 0.42-2.12 µg/L, 옥틸페놀: 5.35-54.81 µg/L), 일본(노닐페놀: 0.08-1.24 µg/L, 옥틸페놀: 0.02-0.48 µg/L), 독일(노닐페놀: ND-0.77 µg/L, 옥틸페놀: ND-0.073 µg/L)의 경우, 본 연구의 노닐페놀 및 옥틸페놀의 검출 농도와 유사하거나 낮은 수준을 보였으며, 스페인(노닐페놀: 6-343 µg/L)에서는 높은 수준을 보였다.¹²⁻¹⁵⁾

3.2. 사업장폐수 업종에 따른 알킬페놀류 배출특성 비교

부산시 사업장폐수 업종별 방류수에서의 노닐페놀과 옥틸페놀 배출 특성 분석 결과를 Table 4와 Fig. 3에 나타내었다. 노닐페놀은 철강·금속가공과 세차시설에서 각 24%의 가장 높은 검출빈도를 보였으며, 폐기물처리·세탁(15%), 식품업(13%)에서도 일부 검출되었다. 섬유 업종에서는 노닐페놀이 50%의 검출빈도를 보였으나, 시료 수(n=2)가 적어 해석에서 제외하였다. 각 업종별 농도 비교 결과에서도 노닐페놀은 철강·금속가공(불검출-21.838 µg/L)과 세차시설(불검출-54.039 µg/L)에서 식품업(불검출-0.710 µg/L), 폐기물처리·세탁(불검출-14.010 µg/L)에 비해

Table 4. Concentration of nonylphenol and octylphenol according to industrial categories

Industrial category	# ^a	Nonylphenol(µg/L)		Octylphenol(µg/L)	
		Conc. range	DF ^b (%)	Conc. range	DF(%)
Food industry	15	ND ^c -0.710	13	ND-1.488	27
Textile and leather processing	2	ND-0.156	50	ND-53.769	50
Petrochemicals	12	ND	0	ND-115.593	42
Steel and metal processing	55	ND-21.838	24	ND-206.053	62
Electrical and electronics	3	ND	0	ND-3.288	33
Waste disposal	20	ND-14.010	15	ND-3.672	45
Repair and car wash	34	ND-54.039	24	ND-60.564	68
Other facilities	5	ND	0	ND-0.444	40

^aNumber of samples, ^bDetection frequency, ^cNot detected

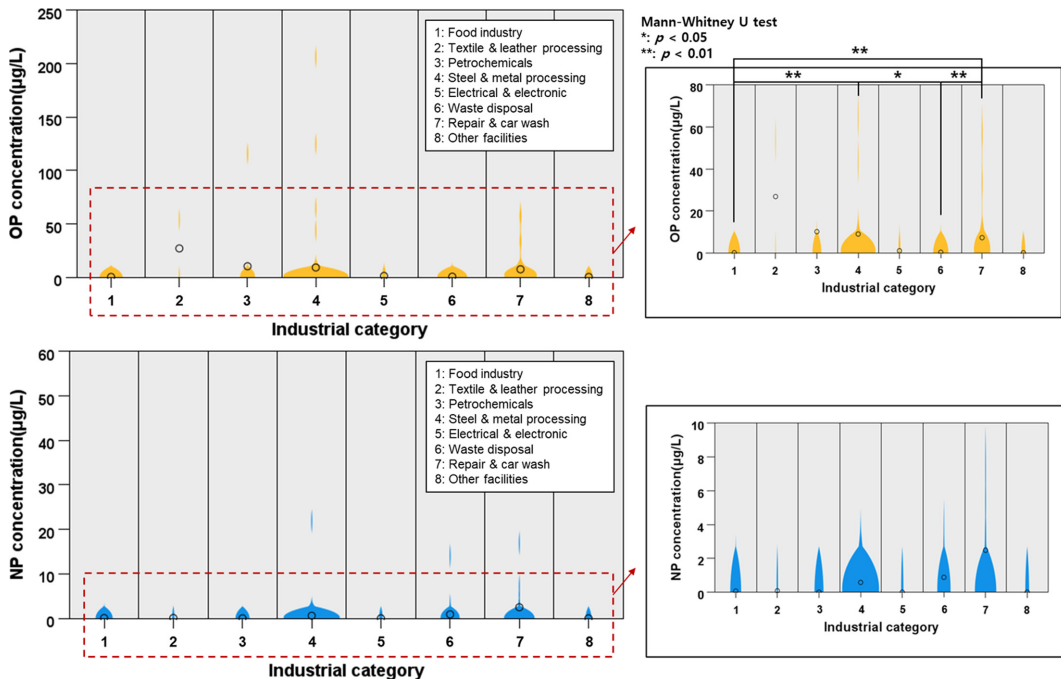


Fig. 3. Concentration of nonylphenol and octylphenol according to industrial categories(ND : below MDL).

통계적으로 높은 농도로 검출되었다(Mann-Whitney U test, $p < 0.05$). 이를 통해 철강·금속가공과 세차시설이 노닐페놀의 주요 배출원임을 추정할 수 있으며, 경기 북부와 광주에서 수행된 선행연구 사례에서 세차시설이 가장 높은 농도(경기 북부: 19.14 $\mu\text{g/L}$, 광주: 114.870 $\mu\text{g/L}$)로 검출된 것과 유사한 결과를 보였다. 또한 철강·금속가공 시 표면의 이물질질을 세정하기 위하여 쓰이는 계면활성제 및 세차업종에서 쓰이는 비이온성계면활성제 등이 여전히 사업장에서 활용되고 있음을 예상할 수 있다.⁴⁾ 현재 폐수의 배출허용기준에 적용되는 항목은 음이온계면활성제인 알킬벤젠술포산염(Alkyl Benzene Sulfonate, ABS)이며, 비이온성계면활성제는 규제하고 있지 않다. 노닐페놀 에톡실레이트와 옥틸페놀 에톡실레이트는 비이온성계면활성제로서 분해되면서 노닐페놀과 옥틸페놀을 생성하게 된다. 따라서, 폐수 방류수 중 비이온성계면활성제에 대한 추가적인 관리가 필요할 것으로 보인다.

옥틸페놀은 세차시설(68%) > 철강·금속가공(62%) > 폐기물처리·세탁(45%) > 석유화학(42%) > 기타(40%) > 전기·전자(33%) > 식품업(27%) 순으로 노닐페놀보다 높은 검출빈도를 보였으며, 업종별로 통계적 유의미한 차이를 보이지 않았으나, 철강·금속가공(206.053 $\mu\text{g/L}$), 석유화학(115.593 $\mu\text{g/L}$), 세차시설(60.564 $\mu\text{g/L}$), 섬유업종(53.769 $\mu\text{g/L}$)에서 노닐페놀보다 높은 농도로 검출되었다. 경기 북부에서는 세차시설(183.87 $\mu\text{g/L}$), 섬유업종(16.10 $\mu\text{g/L}$), 도금 및 철강·금속가공(15.20 $\mu\text{g/L}$), 광주에서는 철강·금속가공(170.113 $\mu\text{g/L}$), 도금(101.756 $\mu\text{g/L}$), 세차시설(82.716 $\mu\text{g/L}$)에서 고농도로 검출된 바 있다. 이는 노닐페놀의 규제에 따라 옥틸페놀이 대체제로서 사용이 증가한 결과로 보인다.^{4,10)}

3.3. 사업장폐수 시설규모에 따른 알킬페놀류 배출특성

물환경보전법에 따라 구분된 사업장폐수의 시설규모별 노닐페놀과 옥틸페놀의 배출 특성은 Fig. 4에 제시된 바와 같다. 본 연구에서는 146개의 사업장폐수 중 1종 5개소, 2종 7개소, 3종 12개소, 4종 35개소, 5종 87개소가 조사되었다. 노닐페놀의 경우, 폐수 배출량이 2,000 $\text{m}^3/\text{일}$ 이상인 1종 사업장 중 20%의 검출빈도를 보였으나, 시료수($n=5$)가 매우 적고 농도가 0.156 $\mu\text{g/L}$ 로 매우 낮은 수준으로 나타났다. 폐수 배출량이 200 $\text{m}^3/\text{일}$ 미만인 4종과 5종 사업장에서는 노닐페놀이 각각 17%, 23%의 검출빈도를 보였다. 반면, 옥틸페놀은 1~5종 모든 시설규모에서 각각 40%, 43%, 42%, 57%, 56%의 검출빈도를 보여 노닐페놀에 비해 다양한 업종 및 규모에서 활용됨을 확인

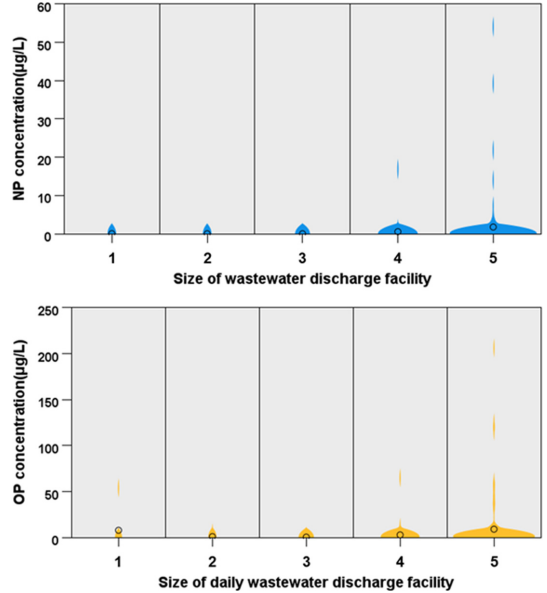


Fig. 4. Concentration of nonylphenol and octylphenol by size of daily wastewater discharge facility.

하였다. 노닐페놀과 옥틸페놀의 주요 배출원인 철강·금속가공 및 세차시설 업종이 전체 89개소 중 80개소가 4~5종 사업장에 집중되어 있으며, 이에 따라 노닐페놀 및 옥틸페놀 모두 1~3종보다 4~5종에서 높은 검출빈도를 보였다. 노닐페놀과 옥틸페놀의 농도 모두 두 주요 배출원이 포함된 4~5종 사업장(노닐페놀: 불검출-54.039 $\mu\text{g/L}$, 옥틸페놀: 불검출-206.053 $\mu\text{g/L}$)에서 상대적으로 높은 농도가 검출되었으나, 1~3종 사업장(노닐페놀: 불검출-0.156 $\mu\text{g/L}$, 옥틸페놀: 불검출-53.769 $\mu\text{g/L}$) 내 검출 수준과 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다(Mann-Whitney U-test, $p > 0.05$).

3.4. 사업장폐수 방류에 따른 환경 중 생태독성영향 평가

본 연구에서는 검출된 사업장폐수의 방류로 인한 수생태계 위해성을 평가하기 위해 환경 유해지수(HQ)를 산출하였으며, HQ 값은 Fig. 5에 제시하였다. 총 146개의 사업장폐수 방류수 중 노닐페놀은 126개소, 옥틸페놀은 67개소에서 ‘낮은 위해성’을 보였으며, 노닐페놀은 14개소, 옥틸페놀은 38개소에서 ‘중간 위해성’을 보였다. 결과적으로 총 146개 사업장 방류수 중 노닐페놀은 140개소, 옥틸페놀은 105개소에서 HQ가 1 미만으로 산출되어 수생태계 위해성이 안전 단계로 확인되었다. 노닐페놀의 ‘중간 위해성’을 나타낸 업종은 철강·금속가공 9건, 세차

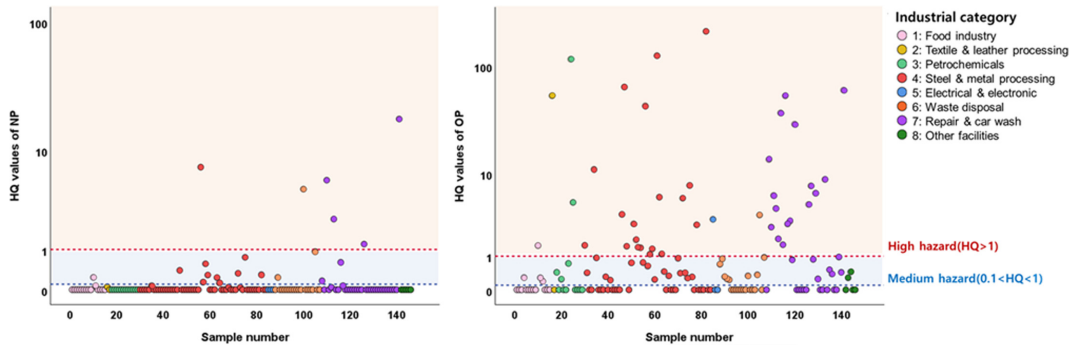


Fig. 5. Ecological risk assessment of nonylphenol and octylphenol in industrial wastewater effluents using the hazard quotient(HQ).

시설과 폐기물처리·세탁 각 2건, 식품업종 1건 순으로 나타났다. 옥틸페놀의 경우, 철강·금속가공 15건, 폐기물처리·세탁 8건, 세차시설 7건, 석유화학 3건, 식품업종 3건 및 기타 2건 순으로 나타났다. 노닐 및 옥틸페놀 모두 철강·금속가공과 세차시설에서 ‘중간 위해성’ 업종이 높게 분포하는 것으로 보였다.

반면, 사업장 방류수 146개소 중 노닐페놀 6개소, 옥틸페놀 41개소에서 HQ 값이 1 이상으로 ‘높은 위해성’으로 나타났다. 노닐페놀은 세차시설 4개소, 폐기물처리·세탁 1개소, 철강·금속가공 1개소 순으로 나타났으며, 옥틸페놀은 철강·금속가공 19개소, 세차시설 16개소, 석유화학 2개소, 폐기물처리·세탁, 식품업종, 섬유업종, 전기·전자 각 1건 순으로 나타났다. 유럽연합이 설립한 기준 대비 노닐페놀은 146개소 중 4.1%의 빈도로 ‘높은 위해성’이 산출되어 산업적 활용에 대한 규제 이후 검출빈도는 많이 낮아졌으나, 세차시설, 철강·금속가공과 폐기물처리·세탁 시설에 대한 관리는 지속될 필요가 있다. 옥틸페놀의 경우, 146개소 중 28.1%가 ‘높은 위해성’으로 나와 본 연구의 모니터링 결과를 통해 옥틸페놀의 대체제로써의

활용과 높은 배출량 모두 확인할 수 있었다. 본 연구 결과와 유사하게 국내 선행연구인 Ryu et al., 2024에서도 노닐페놀과 옥틸페놀의 ‘중간 위해성’ 이상 지점이 전체 시료의 18.5%와 27.3% 보였으며, 옥틸페놀의 수생태계 위해성이 노닐페놀보다 높음을 제시한 바 있다¹⁶⁾. 다만 동일한 희석계수 적용으로 실제 하천의 유량, 지형, 배출특성을 충분히 반영하지 못해 PEC 산정과정에서 일정 수준의 불확실성을 초래할 수 있어, 지역별 조건 차이를 고려한 지속적인 감시체계 마련이 필요하다.

본 연구에서는 수생태계 위해성 평가와 더불어 부산시 사업장 배출수 내 검출 수준을 국내 선행연구를 통해 제시된 배출허용기준(안)과 비교·평가하고자 하였다. 국립환경과학원 ‘수질오염물질 지정 및 걱정 관리방안연구(2020)’에서 제시된 배출허용기준(안)은 노닐페놀의 경우 청정지역(0.01 mg/L), 가·나·특례지역(0.02 mg/L)이고, 옥틸페놀은 청정지역(0.005 mg/L), 가·나·특례지역(0.02 mg/L)이다.¹⁷⁾ 본 연구에서 분석한 146개의 사업장 배출수 방류지역 중 청정지역은 없었으며, 전 지점이 가·나·특례지역에 해당되었다. 노닐페놀과 옥틸페놀의 배출허

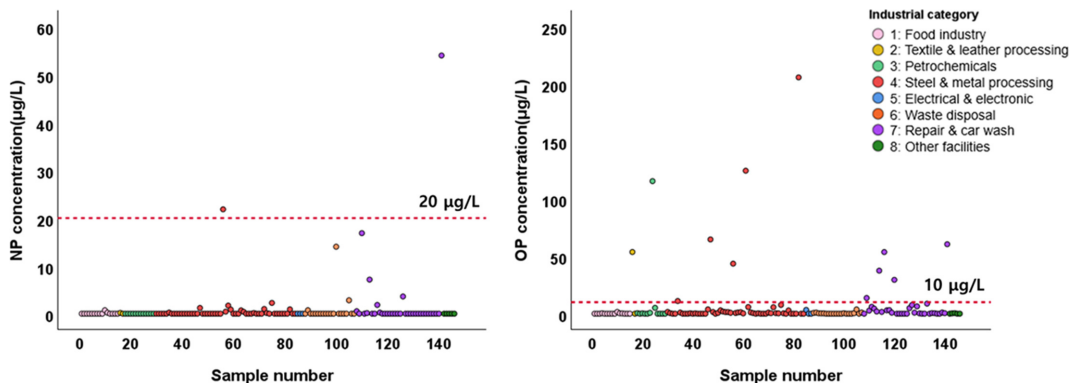


Fig. 6. Comparison between concentrations in industrial wastewater effluents and a draft of discharge limits.

Table 5. Concentration of influent and effluent of the public sewage treatment plant

Compounds		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Avg.
Nonylphenol (µg/L)	Influent	0.641	1.838	1.278	1.745	1.751	1.904	0.800	0.189	0.990	0.189	1.132
	Effluent	0.166	0.129	0.185	ND ^b	0.147	0.159	ND	ND	ND	ND	0.078
	Removal(%) ^a	74	93	86	100	92	92	100	100	100	100	-
Octylphenol (µg/L)	Influent	0.376	0.180	0.208	0.222	0.310	ND	ND	ND	ND	ND	0.130
	Effluent	0.160	ND	ND	ND	0.183	ND	ND	ND	ND	ND	0.034
	Removal(%)	57	100	100	100	41	NA ^c	NA	NA	NA	NA	-

^a(Influent-Effluent) / Influent * 100 (%), ^bNot detected, ^cNot available

용기준(안)은 각각 20 µg/L, 10 µg/L 수준으로, 본 연구 결과와 비교 시 노닐페놀은 2개, 옥틸페놀은 12개의 사업장이 기준을 초과하였다(Fig. 6). 노닐페놀은 철강·금속 가공과 세차시설 각 1개소, 옥틸페놀은 철강·금속가공과 세차시설 각 5개소, 석유화학 및 섬유업종 각 1개소가 기준(안)을 초과하였다. 결과적으로 총 146개소 중 각 1.4%와 8.2% 가량이 배출허용기준(안)을 초과하였다. 하지만 본 연구는 부산지역에 국한된 일시적인 모니터링 자료로, 추후 전국 모니터링 사례를 기반으로 적합한 배출허용기준 법제화 및 지속적 관리 방안 마련이 필요하다.

3.5. 하수처리장 내 알킬페놀류 처리효율 비교

상기 서술된 모니터링 결과를 통해 노닐 및 옥틸페놀류는 부산시 사업장폐수 방류수 내에서 대체로 불검출되었으나, 철강·금속가공, 폐기물처리·세탁 및 세차시설 등 일부 업종은 배출수를 통해 환경 중 배출 가능성이 확인되었다. 따라서, 본 연구에서는 산업폐수를 연계 처리하는 하수처리장 내 유입 및 유출수 모니터링을 통해 알킬페놀류의 처리효율을 평가하고자 하였다. 2024년 1월부터 10월까지 부산시 내 알킬페놀류 주요 배출업종이 다수 위치한 기장군 정관읍의 A처리장 내 유입수 및 방류수 분석 결과, 노닐페놀은 유입수 0.189-1.904 µg/L(평균: 1.132 µg/L), 유출수 불검출-0.185 µg/L(평균: 0.078 µg/L)로 검출되었으며, 옥틸페놀은 유입수 불검출-0.376 µg/L(평균: 0.130 µg/L), 유출수 불검출-0.183 µg/L(평균: 0.034 µg/L)로 검출되었다(Table 5). 전반적으로 노닐 및 옥틸페놀 모두 유입수 대비 유출수에서 농도가 현저히 감소한 것을 확인하였다.

유입 및 배출수 분석을 통한 처리효율은 노닐페놀의 경우 74-100%(평균: 94%), 옥틸페놀은 41-100%(평균: 80%)로 대체로 높은 처리효율을 보였다(Fig. 7). 옥틸페놀이 노닐페놀에 비해 낮은 처리효율을 보였으나, 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다(Mann-Whitney U-test, $p > 0.05$). 다만, 평균적인 처리효율은 높음에도 노닐 및 옥틸

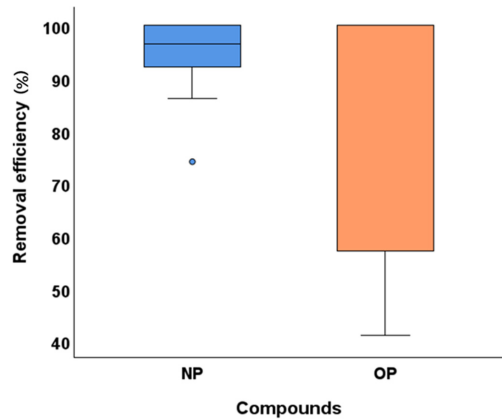


Fig. 7. Removal efficiency of nonylphenol and octylphenol in public sewage treatment plant.

페놀 처리효율은 각각 9%와 28%의 편차를 보였다. 특히 옥틸페놀의 경우, 안정적인 처리를 통해 높은 처리효율을 지속할 필요가 있다. 노닐 및 옥틸페놀의 주요 단위 공정은 응집, 활성슬러지 생물학적 처리 및 활성탄 흡착이 제시되며¹⁶⁾, 활성탄 흡착과 화학적 산화와 같은 고도처리가 높은 처리효율과 우수한 안정성을 나타낸다고 보고되었다.¹⁸⁻²²⁾ 기존의 활성슬러지 공정은 유기물을 효과적으로 처리하고 운영 비용이 낮은 장점이 있지만 상대적으로 알킬페놀류의 처리 안정성이 낮다고 알려져 있다.²³⁻²⁵⁾ 노닐 및 옥틸페놀의 안정적인 처리효율 및 수생태계 건강성 도모를 위해서는 고도화된 흡착 및 화학적 처리공정 운영이 고려될 필요가 있다.

그러나, 본 연구에서 설정한 하수처리장은 산업폐수와 생활하수를 연계 처리하는 시설로, 기존 개별 사업장폐수 방류수에 비해 희석되어 유입될 수 있으며, 검출 농도 또한 개별 사업장에 비해 현저히 낮은 수준으로 나타났다. 저농도 또는 불검출 지점에서의 처리효율 산출은 불확실성이 다소 높을 수 있으며, 하수처리장 내 거동 평가에서도 과대 해석될 우려가 있다. 또한 본 연구는 월 1회 유입수와 방류수를 동일 일자에 채취하는 방식으로 수행되

어 공정 체류시간과 시간대별 수질 변동을 정밀하게 반영하기 어려웠으며, 유입·방류 시료가 완전히 대응되는 짝으로 간주되기에는 구조적 한계가 있다. 따라서, 추후 부산지역 내 고농도로 검출된 개별 사업장 또는 산업폐수 유입 비중이 높은 하수처리장에서의 처리효율을 집중 조사하여 보다 정밀한 거동 평가가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 환경부의 노닐 및 옥틸페놀 감시항목 설정 및 배출 특성 조사의 일환으로 부산지역 사업장 146 개소에서 폐수 방류수 내 대상물질 모니터링 및 수생태계에 미치는 영향을 평가하고자 하였으며, 주요 결과는 다음과 같다:

1) 노닐 및 옥틸페놀 배출 특성: 부산지역 사업장폐수 방류수 146건 중 노닐페놀은 18%, 옥틸페놀은 54%의 검출빈도를 보였으며, 국내·외 선행연구 결과와 전반적으로 유사한 농도 수준이 검출되었다. 노닐페놀 농도에 비해 옥틸페놀의 농도가 통계적으로 유의미하게 높게 검출되어 노닐페놀의 산업계 규제 강화에 따른 대체물질로서 옥틸페놀이 활용되고 있음을 시사한다.

2) 사업장 업종 및 규모별 배출 특성: 노닐 및 옥틸페놀 모두 철강·금속가공 및 세차시설에서 높은 농도 및 검출빈도를 보였으며, 주로 철강·금속가공의 계면활성제 또는 세차업종에서의 비이온성계면활성제가 여전히 산업계에서 활용되고 있음을 확인하였다. 사업장의 규모에 따른 배출 특성은 확인되지 않았다.

3) 방류수 배출에 따른 수생태계 위해성 평가: 환경 유해지수 분석 결과, 노닐페놀의 경우 6개소(4.1%), 옥틸페놀의 경우 41개소(28.1%)에서 '높은 위해성' 수준으로 확인되었다. 특히, 세차시설과 철강·금속가공 업종에서의 높은 위해성이 확인되어 이들 업종에 대한 강화된 관리가 필요할 것으로 판단된다.

4) 하수처리장 처리효율 분석: 하수처리장의 노닐 및 옥틸페놀 처리효율은 각각 평균 94%와 80%로 나타났다. A 처리장은 주요 배출업종이 밀집해 실제 산업폐수가 유입되는 시설로 본 연구의 대상으로 선정되었으나, 산업폐수와 생활하수가 혼합 유입되는 특성상 업종별 배출특성과 처리효율을 직접 연계하는 데에는 한계가 있다. 이에 따라 향후 산업폐수 비중이 높은 처리장을 대상으로 한 추

가 모니터링이 필요하다고 판단된다.

본 연구는 부산지역 사업장에서 방류된 노닐 및 옥틸페놀류가 환경 중에 잔류하여 수생태계 위해성을 유발할 가능성을 제시하고, 이에 따라 적절한 관리 기준 수립과 처리시설의 안정적인 처리효율 관리의 필요성을 강조하였다. 다만 본 연구는 부산지역의 제한된 범위에서 확보된 배출농도 자료를 기반으로 하여 지역·업종 간 변동성을 충분히 반영하는 데 한계가 있으며, 보다 신뢰도 높은 기준 마련을 위해서는 전국 단위의 반복 모니터링과 지속적인 관리체계 구축이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 NIER-2024-01-03-001)을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

- G.G. Ying, B. Williams and R. Kookana, "Environmental Fate of Alkylphenols and Alkylphenol Ethoxylates—A Review", *Environment International*, **2022**, 28(3), 215–226.
- European Chemical Agency(ECHA), https://echa.europa.eu/environmental-quality-standards?p_p_id=eucleflegislationlist_WAR_euclefportlet&p_p_lifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_eucleflegislationlist_WAR_euclefportlet_javax.portlet.action=searchLegislation-Lists, December 2024.
- US Environmental Protection Agency, Nonylphenol (NP) and Nonylphenol Ethoxylates (NPEs), <https://www.epa.gov/assessing-and-managing-chemicals-under-tsca/nonylphenol-np-and-nonylphenol-ethoxylates-npes>, December 2024.
- S. Yoon, J. Jung, I. Seo, J. Kim, S. Kim, H. You, H. Son, D. Baek, S. Choi, J. Yang and B. Kwon, "Effects of Nonylphenol and Octylphenol on Wastewater Discharge Facilities in Northern Gyeonggi Province", *Journal of Environmental Analysis Health Toxicology*, **2024**, 27 (3), 142-150.
- C. Carlsson, A. K. Johansson, G. Alvan, K. Bergman and T. Kühler, "Are Pharmaceuticals Potent Environmental Pollutants?: Part I: Environmental Risk Assessments of Selected Active Pharmaceutical Ingredients", *Science of The Total Environment*, **2006**, 364(1-3), 67-87.
- D. Li, M. Kim, W. J. Shim, U. H. Yim, J. R. Oh and Y. J. Kwon, "Seasonal Flux of Nonylphenol in Han River,

- Korea”, *Chemosphere*, **2004**, 56(1), 1-6.
7. J. B. Lee, J. J. Lee, Y. H. Cho, J. H. Yoon, S. H. Hong, D. H. Lee, Y. H. Cho and H. S. Shin, “Contamination Sources of Several Potentially Hazardous Compounds Found at the Gap Stream and the Miho Stream, Two Major Tributaries of the Geum River”, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, **2016**, 35(1), 15-23.
 8. S. Kim, K. J. Roh and D. M. Kim, “Behavior Characteristics of Nonylphenol in the Downstream of River in Busan, Korea”, *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **2019**, 52(1), 74-80.
 9. S. J. Seo, P. K. Choi, W. K. Nam, S. M. Hwang, J. Y. Lee, S. H. Jung and S. G. Park, “Characteristics of Nonylphenol and Octylphenol Discharge from Wastewater Treatment Facilities in Southern Gyeonggi-Do”, *Journal of Environmental Analysis Health and Toxicology*, **2023**, 26(2), 67-75.
 10. W. J. Lee, D. J. Seo, Y. J. Jeong, M. A. Park, J. H. Park, H. D. Jeon, Y. G. Lee, G. Y. Seo, C. J. Cheong and N. Kim, “A Survey of Unregulated Water Pollutants from Wastewater Discharge Facilities in Gwangju Province”, *Journal of Korean Society Environmental Technology*, **2023**, 24(1), 47-57.
 11. J. R. Lee, S. I. Park, S. I. Jeon, H. J. Kim, H. J. Shin, C. H. Ji and C. O. Park, “A Study on the Characteristics of Water Pollutant Candidates Discharge in Industrial Wastewater in Jeollanam-Do, Focusing on Octylphenol and Nonylphenol”, *Journal of Korean Society Environmental Technology*, **2024**, 25(1), 66-79.
 12. M. Solé, M. J. López de Alda, M. Castillo, C. Porte, K. Ladegaard-Pedersen and D. Barceló, “Estrogenicity Determination in Sewage Treatment Plants and Surface Waters from the Catalanian Area (NE Spain)”, *Environmental Science & Technology*, **2000**, 34(24), 5076-5083.
 13. T. Isobe, H. Nishiyama, A. Nakashima and H. Takada, “Distribution and Behavior of Nonylphenol, Octylphenol, and Nonylphenol Monoethoxylate in Tokyo Metropolitan Area: Their Association with Aquatic Particles and Sedimentary Distributions”, *Environmental Science & Technology*, **2001**, 35(6), 1041-1049.
 14. H. M. Kuch and K. Ballschmiter, “Determination of Endocrine-Disrupting Phenolic Compounds and Estrogens in Surface and Drinking Water by HRGC-(NCI)-MS in the Picogram per Liter Range”, *Environmental Science & Technology*, **2001**, 35(15), 3201-3206.
 15. B. Bina, F. Mohammadi, M. M. Amin, H. R. Pourzamani and Z. Yavari, “Determination of 4-Nonylphenol and 4-Tert-Octylphenol Compounds in Various Types of Wastewater and Their Removal Rates in Different Treatment Processes in Nine Wastewater Treatment Plants of Iran”, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **2018**, 26(1), 183-190.
 16. H. D. Ryu, H. Han, T. J. Park, J. H. Park and Y. S. Kim, “New Findings on the Occurrence, Removal, and Risk Assessment of Nonylphenol and Octylphenol in Industrial Wastewater Treatment Plants in Korea”, *Journal of Hazardous Materials*, **2024**, 461, 132615.
 17. 환경부, “수질오염물질 지정 및 적정 관리방안 연구”, **2020**.
 18. Y. Kalmykova, N. Moona, A. M. Strömvall and K. Björklund, “Sorption and Degradation of Petroleum Hydrocarbons, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Alkylphenols, Bisphenol A and Phthalates in Landfill Leachate Using Sand, Activated Carbon and Peat Filters”, *Water Research*, **2014**, 56, 246-257.
 19. Z. Huang, B. Gong, C. P. Huang, S. Y. Pan, P. Wu, Z. Dang and P. C. Chiang, “Performance Evaluation of Integrated Adsorption-Nanofiltration System for Emerging Compounds Removal: Exemplified by Caffeine, Diclofenac and Octylphenol”, *Journal of Environmental Management*, **2019**, 231, 121-128.
 20. O. Čizmarová, B. Urmínská, J. Derco, A. Kassai and R. Zakhar, “Removal of Alkylphenols from Industrial Wastewater by Means of Ozone-Based Processes and Fenton Reaction”, *Chemical Papers*, **2022**, 76(3), 1851-1859.
 21. M. Gutiérrez, V. Grillini, D. Mutavdžić Pavlović and P. Verlicchi, “Activated Carbon Coupled with Advanced Biological Wastewater Treatment: A Review of the Enhancement in Micropollutant Removal”, *Science of The Total Environment*, **2021**, 790, 148050.
 22. H. Ateş and M. E. Argun, “Advanced Oxidation of Landfill Leachate: Removal of Micropollutants and Identification of by-Products”, *Journal of Hazardous Materials*, **2021**, 413, 125326.
 23. M. Dehboudeh, P. Dehghan, A. Azari and M. Abbasi, “Experimental Investigation of Petrochemical Industrial Wastewater Treatment by a Combination of Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) and Electro-Fenton Methods”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **2020**, 8(6), 104537.
 24. V. Pítás, V. Somogyi, A. Kárpáti, P. Thury and T. Fráter, “Reduction of Chemical Oxygen Demand in a Conventional Activated Sludge System Treating Coke Oven Wastewater”, *Journal of Cleaner Production*, **2020**, 273, 122482.
 25. T. Han, J. Zheng, Y. Han, X. Xu, M. Li, C. Schwarz and L. Zhu, “Comprehensive Insights into Core Microbial Assemblages in Activated Sludge Exposed to Textile-Dyeing Wastewater Stress”, *Science of The Total Environment*, **2021**, 791, 148145.