

## 산업폐수처리장에서의 미량유해물질 제거율 평가

이인석 · 심원진 · 오정은<sup>†</sup> · 김창원 · 장윤석\* · 윤영삼\*\*

부산대학교 환경공학과 · \*포항공과대학교 환경공학부 · \*\*국립환경과학원 낙동강 물환경연구소

(2006년 12월 29일 접수, 2007년 2월 2일 채택)

### Evaluation of Removal Efficiencies of Micropollutants in Wastewater Treatment Plants

In-Seok Lee · Won-Jin Sim · Jeong-Eun Oh<sup>†</sup> · Chang-Won Kim · Yoon-Seok Chang\* · Young-Sam Yoon\*\*

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

\*School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

\*\*Nakdong\_River Water Environment Laboratory, National Institute of Environmental Research

**ABSTRACT :** 66 micropollutants analyses in 9 wastewater treatment plants(WWTPs) along Nak-dong river were implemented to identify the concentrations and removal efficiencies before and after treatment processes. As a result of study, the concentration levels discharged from WWTP effluents to water system were below the water quality criteria and the levels of other studies. The removal efficiencies were 84.6%(DAF/CCR) and 81.6%(AC) for 1,4-dioxane. Phenol, Clphs and PAHs were removed 94.6%, 66.4% and 80.6% respectively by the activated sludge(AS) process. The removal efficiencies of Clbzs were 45.3% for the activated sludge(AS) process and 60.6% for the activated carbon(AC) process. However, other processes besides AS and AC, the removal efficiencies of Clbzs were very low(<20%). The sand filtration(SF) process that could remove particle matters showed the best efficiency for PCDDs / Fs removal( $\geq 99\%$ ). However, in case of relatively low PCDDs/Fs concentration level in influent, the removal efficiency was not so high( $\leq 50\%$ ).

**Key Words :** Micropollutant, Wastewater Treatment Plant, Removal Efficiency

**요약 :** 본 연구에서는 낙동강 수계 9곳의 산업폐수처리장을 대상으로 66종 미량유해물질을 대상으로 미량유해물질의 수계 방류 현황과 처리 공정별 제거율을 조사하였다. 그 결과 산업폐수처리장을 통해 수계로 방류되는 대상 미량유해물질의 농도수준은 기준치 이하이거나 타 연구의 농도수준보다 낮았다. 산업폐수 처리공정을 거치면서 1,4-다이옥산이 가압부상/화학응집, 활성탄흡착 처리공정에 의해 각각 84.6% 및 81.6% 제거되었다. 페놀 및 클로로페놀류, 다환방향족탄화수소류의 경우 표준 활성슬러지법에 의해 각각 94.6%, 66.4% 및 80.6% 제거되었다. 클로로벤젠류는 표준 활성슬러지법과 활성탄흡착법에 의해 각각 45.3% 및 60.6% 제거되었으나, 기타 처리공정에서는 제거율이 매우 낮았다(<20%). 또한 다이옥신류는 입자상 물질을 제거할 수 있는 공정인 사여과(SF)에서 제거효율이 가장 뛰어났지만(99% 이상), 사여과 공정일지라도 유입수의 농도가 낮은 경우에는 제거율이 높지 않았다(50% 이하).

**주제어 :** 미량유해물질, 산업폐수처리장, 제거율

## 1. 서론

산업이 발달함에 따라 신종 미량유해물질의 등장과 이에 따른 사용량이 계속 증가하고 있어 유해물질로 인한 환경오염의 심각성과 그 위해성에 대한 관심이 커지고 있다.<sup>1)</sup> 이에 따라 미국과 같은 환경선진국에서는 미량유해물질의 환경 내 허용잔류농도에 대한 기준강화, 새로운 미량유해물질에 대한 분석법 확립 및 위해성 평가 등 관리를 강화시켜 나가고 있는 추세<sup>2)</sup>이나 국내의 경우 종합적인 관리와 사전예방에 관한 연구가 미흡한 실정이다.<sup>3)</sup> 특히 산업폐수처리장을 통해 방류되는 방류수 내의 미량유해물질은 생산 공정에서 발생한 후 폐수에 포함되어 수계로 직접 방류되고 있기 때문에 잦은

수질오염문제를 일으키고 있다. 이러한 미량유해물질류 중 헥사클로로벤젠과 다이옥신류는 잔류성 유기오염물질(POPs)로 지정되어 있으며,<sup>4)</sup> 1,4-디클로로벤젠, 다환방향족탄화수소류는 내분비계 장애물질(EDCs)로 보고되고 있다.<sup>5)</sup> 이로 인해 국내외에서는 페놀계 화합물을 다양한 효소를 이용한 생물학적 방법, 활성탄흡착법 등을 통해 처리하고 있으며,<sup>6)</sup> 1,4-다이옥산의 경우는 촉매습식산화법을 이용한 처리법<sup>7)</sup> 등 수종의 미량유해물질 제거에 관한 연구가 최근 활발하게 수행되고 있다. 그러나 대부분의 연구가 실험실 규모에서 수행되고 있어<sup>6,7)</sup> 실제 혼합폐수를 대상으로 수행한 연구는 거의 없는 실정이다. 또한 국내에서는 산업폐수 중의 미량유해물질에 대한 분석 자료가 미비할 뿐 아니라 폐수처리장의 기존 처리 공정이 질소나 인과 같은 물질을 제거하는 것에 초점이 맞추어져 있어 실제 산업폐수처리장을 대상으로 처리공정별 미량유해물질의 제거율을 조사한 연구는 전무하다. 그러므로 실제 산업공단의 혼합폐수에서 발생하는 미량유해물질에 대한

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: jeoh@pusan.ac.kr  
Tel: 051-510-3513

Fax: 051-582-3965

국내 기존 처리공정에 따른 제거율을 파악하는 것은 국내 폐수처리장에서 발생하는 미량유해물질의 현황 및 공정의 처리 효율을 판단할 수 있는 중요한 자료가 될 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 낙동강 수계에 위치한 9개 산업공단 폐수처리장을 대상으로 U.S.EPA가 정한 ‘Priority Pollutants’ 중 클로로페놀류(Clphs), 클로로벤젠류(Clbzs), 다환방향족탄화수소류(PAHs), 다이옥신류(PCDDs/Fs)와 2004년 낙동강 수계에서 고농도로 검출되어 문제가 되었던 1,4-다이옥산(1,4-dioxane)을 포함한 총 66종의 미량유해물질을<sup>2,8)</sup> 분석하여 폐수처리장을 통해 수계로 방류되는 미량유해물질의 현황과 처리공정별 미량유해물질의 제거율을 조사하였다. 이를 통해 본 연구는 국내 산업폐수처리장에서의 미량유해물질의 발생현황 및 실제 폐수처리장의 처리공정에 의한 제거율을 판단하기 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료 채취

산업폐수처리장별 처리공정에 따른 미량유해물질의 제거율을 조사하기 위해 2005년 6월부터 12월까지 낙동강 유역의 9개 산업폐수처리장에서 유입원수와 방류수 및 주처리 공정의 후단에서 시료를 채취하였다. 대상 산업폐수처리장의 주처리 공정과 처리공정에 따른 시료채수 지점은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. 분석방법

본 연구의 대상 미량유해물질류는 1,4-다이옥산, 페놀 및 클로로페놀류 20종, 클로로벤젠류 12종, 다환방향족탄화수소류 16종, 다이옥신류 17종이다. 1,4-다이옥산의 분석은 박선구<sup>9)</sup>와 modified U.S.EPA method 8270<sup>10)</sup>을 참고하여 내부표준물질(1,4-dioxane-d<sub>8</sub>) 주입 후 액-액 추출하였다. 페놀류와

클로로벤젠류, 다환방향족탄화수소류는 U.S.EPA method 528, 8041, 524.2, 550<sup>10)</sup>을 참고하여 내부표준물질(2-chlorophenol-d<sub>4</sub>, 1,4-dichlorobenzene-d<sub>4</sub>, naphthalene-d<sub>8</sub>, acenaphthene-d<sub>10</sub>, phenanthrene-d<sub>10</sub>, chrysene-d<sub>12</sub>, perylene-d<sub>12</sub>) 주입 후 액-액 추출하였다. 추출 후 회수율을 판단하기 위해 실린지 첨가용 표준물질(p-Terphenyl-d<sub>14</sub>)을 첨가해 기기분석용 시료로 하여 GC-MSD(GC 6890/MSD 5973, Agilent)로 분석하였다. 다이옥신류의 분석은 modified EPA method 1613<sup>10)</sup>을 따랐으며, HRGC/HRMS(Hewlett Packard Model 6890 series II/JMS 700T)로 기기분석을 수행하였다. 각 미량유해물질류 기기분석은 2개의 특정 이온을 선택하고 체류 시간에 따라 Grouping하여 분석하였으며 측정된 2가지 선택이온의 피크 면적비는 동위원체의 면적비에 대하여 ±20% 이내에 있으며, 신호 대 잡음의 비(S/N ratio)가 2.5 이상인 피크를 선정하여 내부표준법으로 정량하였다. 대상 미량유해물질의 회수율은 50~120%였으며 검량선의 R<sup>2</sup> 값은 0.999 이상이었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 산업폐수처리장 방류수에서의 미량 유해물질 배출 농도 현황

각 산업공단 폐수처리장의 처리공정별로 채취된 시료에서 검출된 미량유해물질의 농도수준을 Table 2에 나타내었다. 최종 방류수의 경우 1,4-다이옥산은 0.76~18.2 µg/L로 국내 1,4-다이옥산 규제치인 50 µg/L 이내의 값을 보였다. 또한 이 검출수준은 2005년 전국 35개 정수장의 상수원수와 정수에 대해 국립환경과학원(2006)<sup>8)</sup>에서 조사한 검출농도(N.D~35.84 µg/L)에 비해 상대적으로 비슷하거나 낮은 수준이었다. 페놀과 클로로페놀류의 합은 0.13~1.58 µg/L로 국내 수질유해물질에 대한 지역별 배출허용기준 항목<sup>11)</sup> 중 청정지역에 대한 기준(페놀류의 합이 1 mg/L 이하)에 비해 훨씬 낮은 농도값을 나타내었다. 또한 명승운<sup>12)</sup> 등이 보고한 국내 산업 폐수처리장 유출수 중의 클로로페놀류 농도인 1~12 µg/L와 CRD(Capital Regional District, Canada)<sup>13)</sup>가 폐수처리장 유출수에서 조사한 값인 ~1.5 µg/L에 비해서도 비슷하거나 낮은 수준이었다. 클로로벤젠류와 다환방향족탄화수소류는 각각 0.020~0.270 µg/L, 0.117~0.629 µg/L의 범위를 보였지만 현재 국내 수질 기준이 마련되지 않아 직접적인 비교는 불가능하였다. 그러나 Anastasia(Greece, ~18.10 µg/L) 등<sup>14)</sup>과 EU(0.1~70 µg/L)<sup>15)</sup>에서 보고한 검출농도 수준에 비해 낮음을 알 수 있었다. 다이옥신류는 최종 방류수에서 0.073~105.0 pg/L(0.027~5.470 pg-TEQ/L)로 검출되었다. 국내는 다이옥신류의 방류수 수질 기준이 없으나 일본의 방류수 수질 기준(10 pg-TEQ/L)<sup>11)</sup>을 만족시키고 있음을 알 수 있었다.

### 3.2. 미량유해물질별 제거율

수처리 공정에 따른 미량유해물질별 제거율을 파악하기 위해 대상 9개 산업공단 폐수처리장에 대해 크게 생물학적 처리, 화학적 처리, 고도처리 각각을 선택적으로 적용하고 있는

**Table 1.** The wastewater treatment processes and sampling points in 9 WWTPs

Main treatment process	WWTP	Treatment processes and Sampling points(㉠)
Biological	NC	Influent(1)→AS→Effluent→(2)
Chemical	GJ	Influent(1)→DAF/CCR→Effluent→(2)
	DS	Influent(1)→AS(2)→CCR→Effluent→(3)
Biological + Chemical	DA	Influent(1)→CCR(2)→RBC→Effluent→(3)
	SP	Influent(1)→AS(2)→CCR+SF→Effluent→(3)
	YS	Influent(1)→CCR(2)→AS+SF→Effluent→(3)
Biological + Chemical	CS	Influent(1)→CCR(2)→AS(3)→SF+OC→Effluent→(4)
	UG	Influent(1)→CCR(2)→AS(3)→AC→Effluent→(4)
+ Advanced	SS	Influent(1)→AS+RBC(2)→CCR(3)→SF→Effluent→(4)

- AS: Activated sludge, DAF: Dissolved air flotation, CCR: Chemical coagulation reactor, RBC: Rotating biological reactor, SF: Sand filtration, AC: Activated carbon, OC: Ozone Contactor  
 - ①,②,③,④ : sampling points

**Table 2.** Concentration levels of micropollutants in 9 WWTPs

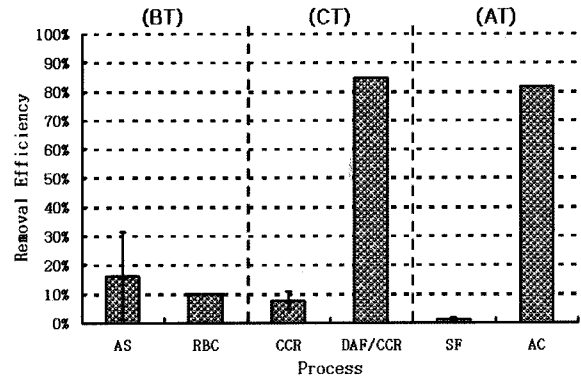
WWTP		1,4-Dioxane Phenol Clphs Clbzs PAHs					PCDD/Fs	
		μg/L					pg/L	pg-TEQ/L
NC	①	1.142	16.52	0.199	0.079	0.545	115.8	1.893
	②	2.468	0.292	0.704	0.065	0.117	79.98	2.571
GJ	①	6.300	16.21	0.025	0.044	1.622	124.3	3.740
	②	0.972	0.538	0.048	0.032	0.169	105.0	5.470
DS	①	6.272	10.83	2.619	0.360	1.349	126.7	1.900
	②	11.72	0.436	0.938	0.261	0.481	-	-
	③	12.19	0.394	1.189	0.228	0.444	101.1	3.410
DA	①	4.035	1.896	0.298	0.036	1.561	103.3	3.770
	②	3.496	0.746	0.223	0.027	0.242	-	-
	③	3.147	0.652	0.154	0.033	0.629	93.10	2.990
SP	①	9.809	9.901	3.964	0.249	2.793	1549.6	36.58
	②	11.99	0.554	0.372	0.248	0.386	-	-
	③	11.37	0.584	0.389	0.270	0.422	12.44	0.050
YS	①	6.435	11.16	0.423	0.059	6.441	8.649	0.425
	②	6.976	8.588	0.645	0.089	1.205	-	-
	③	7.161	0.576	0.232	0.040	0.389	7.598	0.027
CS	①	6.397	N.D	1.741	0.464	0.779	1250.3	25.00
	②	5.851	N.D	1.823	0.405	0.756	-	-
	③	0.734	N.D	0.279	0.061	0.225	-	-
	④	0.763	0.015	0.110	0.074	0.279	16.94	0.150
UG	①	23.16	5.057	0.688	1.667	311.4	20.73	0.692
	②	17.23	0.467	0.221	0.812	4.890	-	-
	③	15.50	0.407	0.226	0.051	0.190	-	-
	④	2.849	0.384	0.036	0.020	0.163	10.85	0.034
SS	①	20.80	20.40	9.945	0.420	34.13	78.53	1.711
	②	22.42	1.057	0.691	0.087	0.522	-	-
	③	18.62	0.759	0.495	0.101	0.226	-	-
	④	18.21	0.686	0.396	0.145	0.178	0.073	0.291

N.D: Not Detected

네 그룹으로 나눈 후 각 처리공정에서의 제거율을 구하여 평균값을 구하였다(Table 1). 이에 따라 생물학적 처리(Biological Treatment, BT) 방법에 의해 수처리를 하고 있는 폐수처리장은 표준 활성슬러지법(AS)을 사용하고 있는 7곳과 회전원판법(RBC) 1곳이었으며, 화학적 처리(Chemical Treatment, CT) 방법으로는 화학응집법(CCR) 7곳과 가압부상/화학응집법(DAF/CCR)을 사용하는 1곳이었다. 또한 고도처리(Advanced Treatment, AT) 방법을 사용하고 있는 폐수처리장은 사여과법(SF) 2곳과 활성탄 흡착법(AC) 1곳이었다.

**3.2.1. 1,4-다이옥산 제거율**

각 산업폐수처리장의 처리공정별 1,4-다이옥산의 제거율은 Fig. 1과 같다. 생물학적 처리방법인 표준 활성슬러지법(AS)을 채택하고 있는 7개 폐수처리장의 경우 평균 제거율은 16.2% (SD, ±15.2%)였지만 두 곳의 폐수처리장만이 감소(각각 87.5%, 25.6%)하였고 다른 5곳 폐수처리장의 경우는 오히려 증가하였거나 제거가 되지 않는 것으로 나타났다. 또한 부착미생물



**Fig. 1.** Removal efficiency of 1,4-dioxane by each process.

방법인 회전원판법(RBC)을 운영하는 DS공단 폐수처리장의 경우 10%의 낮은 제거율을 보였다. 화학응집법(CCR)에 의한 제거율은 평균 7.7%(SD, ±3%)였으나 단순한 물리적 처리만이 아니라 화학응집법의 복합처리공정인 가압부상/화학응집법(DAF/CCR)에 의한 제거율은 84.6%로 일반적인 화학적·생물학적 처리공정에 비해서 효과적인 것으로 나타났다. 사여과 공정(SF)에 의해서는 두 곳의 폐수처리장에서 각각 2.2%, 0%로 거의 제거되지 않았다. 그러나 활성탄흡착(AC) 공정에서는 81.6%의 높은 제거율을 보여 기존연구에서 활성탄흡착공정이 1,4-다이옥산을 56.1~99.6% 범위로 제거됨을 보고한 결과와 부합하는 것으로 보인다.<sup>16)</sup>

이와 같은 결과로 볼 때, 실제 혼합폐수 내의 1,4-다이옥산 처리에 있어서는 가압부상/화학응집법(84.6%)과 활성탄흡착 공정(81.6%)이 매우 우수한 제거율을 보이는 것으로 사료된다.

**3.2.2. 페놀 및 클로로페놀류 제거율**

생물학적 처리방법 중 표준 활성슬러지법(AS)에 의한 페놀과 클로로페놀류의 제거율은 페놀의 경우 평균 94.6%(SD, ±1.1%), 클로로페놀류는 평균 66.4%(SD, ±14.7%)로 높은 제거율을 보였다. 그러나 회전원판법(RBC)의 경우 페놀과 클로로페놀류에 대해서 표준 활성슬러지 방법보다 낮은 제거율(12.6%, 31.0%)을 나타내는 것으로 조사되었다(Fig 2). 클로로페놀류의 유입수 농도가 다른 공단 폐수처리장에 비해 높았던 폐수처리장에서는 표준 활성슬러지법에 의해 90% 이상의 높은 제거율을 보였다. 페놀류를 포함하는 폐수의 경우 표준 활성슬러지를 이용한 생물학적 공정으로 80% 이상의 완전한 분해가 가능하다고 알려져 있는데<sup>17-19)</sup> 본 연구에서도 이와 같은 유사한 결과가 나타났다. 각 공단 폐수처리장의 페놀과 클로로페놀류의 제거율을 비교하면 페놀의 제거율이 클로로페놀류의 제거율보다 높는데, 이는 클로로페놀류가 가진 염소 치환기로 인하여 페놀보다 분해속도가 느리기 때문으로 사료된다.<sup>20)</sup> 화학응집법(CCR)에 의한 화학적 처리공정을 폐수처리의 1차적 처리 공정으로 채택하고 있는 세 곳 폐수처리장에서의 페놀과 클로로페놀류의 제거율은 비교적 낮게 나타났다[DS(60.1%, 25.3%), CS(불검출, 0%), YS(23.0%, 0%)]. 반면 가압부상/화학응집법(DAF/CCR)에 의한 페놀의 제거율은 96.7%로 화학응집만을 실시하는 공정과는 달리 가압부상과 화학응집을 복합적으로 실시함으로써 페놀의 제거율이 표준

활성슬러지를 이용한 생물학적 공정과 비슷한 수준으로 향상되었음을 알 수 있었다. 그러나 이 공정에서는 클로로페놀류(0%)는 제거되지 않았는데 이는 GJ 폐수처리장에서 검출된 클로로페놀류의 농도가 타 공단에 비해서 10배 이상 낮고, 클로로페놀류가 가진 염소 치환기로 인하여 페놀보다 분해속도가 느리기 때문인 것<sup>20)</sup>으로 사료된다. 사여과(SF) 공정에 의해서 클로로페놀류가 40.5%(SD, ±10.1%) 제거됨을 보였는데, 이는 클로로페놀류가 입자상에 흡착되어 제거되는 것으로 판단된다.<sup>20)</sup> 반면 페놀은 10% 미만의 낮은 제거율을 보여 클로로페놀류에 비해 제거효과가 떨어짐을 알 수 있었다. 활성탄흡착 공정(AC)을 통한 제거율은 클로로페놀류의 경우 84.2%로 페놀의 5.5%에 비해 높은 제거율을 보여 클로로페놀류가 페놀보다 활성탄 흡착이 더 잘 이루어지는 것으로 사료된다. 또한 검출되지 않은 penta-클로로페놀을 제외하고 클로로페놀류를 염소치환 개수가 같은 동족체에 따라 나누어 제거율을 판단했을 때, 입자상 물질의 제거가 가능한 사여과와 활성탄흡착 공정에 의해 염소수가 많을수록 제거되는 경향이 다소 높아지는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 이는 옥탄올-물 분배계수( $K_{ow}$ )가 높은 고염소 클로로페놀류가 저염소 클로로페놀류에 비해 입자상물질에 더 잘 흡착되는 것에 기인하는 것으로 보인다.<sup>20)</sup>

이상의 결과를 통해 혼합폐수 내의 페놀은 표준 활성슬러지법과 가압부상/화학응집법에 의해 높은 수준(94.6%, 96.7%)으로 제거되고, 클로로페놀류는 표준 활성슬러지법과 활성탄흡착 공정을 통해 높은 수준(66.4%, 84.2%)으로 제거됨을 볼 수 있었다.

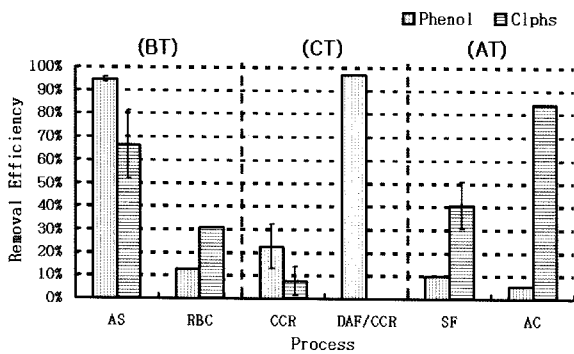


Fig. 2. Removal efficiency of phenols by each process.

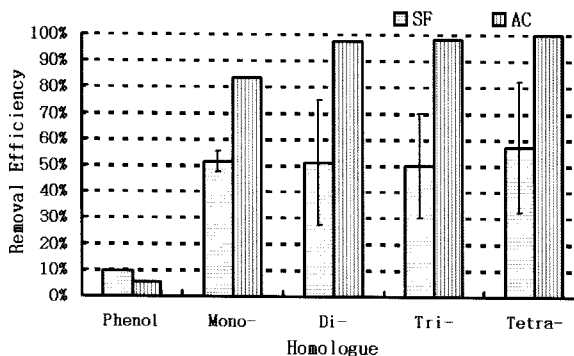


Fig. 3. Removal efficiency of phenol and clphs homologue by SF & AC.

### 3.2.3. 클로로벤젠류 제거율

클로로벤젠류는 생물학적 처리방법인 표준 활성슬러지법(AS)에 의해 45.3%(SD, ±14.6%)의 제거율을 보였으나, 부착미생물 방법인 회전원판법(RBC)으로는 제거되는 경향을 보이지 않았다(Fig. 4). 화학응집법(CCR)에 의한 제거율은 평균 20.4%(SD, ±15.5%)였고, 가압부상/화학응집법(DAF/CCR)에 의해서는 26.5%를 나타내 화학적 처리방법에 의한 클로로벤젠류의 제거율은 낮았다. 사여과(SF) 공정에 의해서는 클로로벤젠류의 제거가 이루어지지 않았지만, 활성탄흡착 공정(AC)을 택하고 있는 UG 폐수처리장은 클로로페놀류와 마찬가지로 낮은 농도수준에서도 60.6%의 비교적 높은 제거율을 가지는 것으로 조사되었다. 이처럼 실제 혼합폐수 내의 클로로벤젠류는 Table 2에서 볼 수 있듯 UG 폐수처리장의 유입수(1.67 µg/L)를 제외하고는 대부분 산업공단 폐수처리장의 처리공정의 전·후단에서 1 µg/L 이하로 매우 낮아 그 제거율을 명확하게 판단하기 어려웠다.

그러나 전체적으로 판단해 볼 때 클로로벤젠류는 표준 활성슬러지법(45.3%)과 활성탄흡착(60.6%)에 의한 비교적 높은 수준으로 제거되었으나 다른 처리공정에 의해서는 제거되지 않거나 20% 이하의 낮은 제거율을 보임을 알 수 있었다.

### 3.2.4. 다환방향족탄화수소류(PAHs) 제거율

PAHs는 생물학적 처리방법인 표준 활성슬러지법(AS)에 의한 제거율이 평균 80.6%(SD, ±6.6%)로 조사되었다(Fig. 5). 이 중 SS와 UG 두 곳 폐수처리장의 경우 공정 유입농도가 다른 폐수처리장의 3 µg/L 이하에 비해 고농도였으며(34.13 µg/L, 4,890 µg/L) 98% 이상의 높은 제거율을 보였다. 그러나 부착미생물 방법인 회전원판법(RBC)에서는 제거되는 경향을 나타내지 않았다. 화학응집법(CCR)에 의한 제거율은 47.1%(SD, ±19.6%)였는데, 특히 DA, UG, YS 폐수처리장의 경우 공정 유입농도가 다른 공단폐수처리장에 비해 비교적 높은 수준(1.561 µg/L, 311.4 µg/L, 6.441 µg/L)으로 제거율 역시 84.5%, 96.1%, 81.3%로 높았다. 또한 가압부상/화학응집법(DAF/CCR)에 의해서도 89.6%의 높은 제거율을 나타냈다. 이는 PAHs가 입자상에 응집하려는 성질<sup>21)</sup> 때문인 것으로 사료된다. 사여과(SF) 공정을 가지는 두 곳의 폐수처리장에서는 각각 0.0%, 20.9%의 낮은 제거율을 보였으며 활성탄흡착(AC)에 의해서도 14.4%로 제거율이 낮았다.

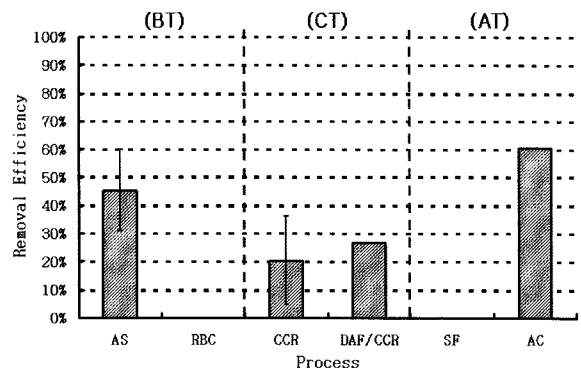


Fig. 4. Removal efficiency of clbzs by each process.

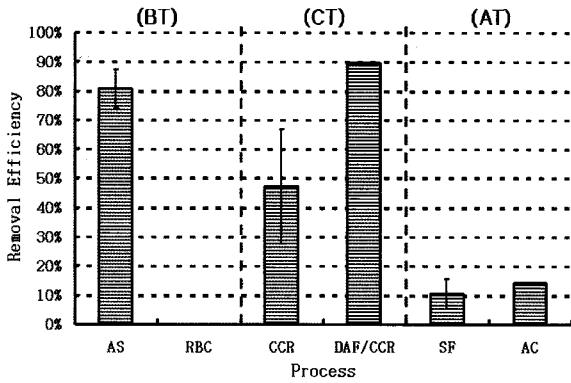


Fig. 5. Removal efficiency of PAHs by each process.

이상의 결과에 비추어 볼 때 실제 혼합폐수 내의 PAHs는 표준 활성슬러지법과 가압부상/화학응집법으로 높은 수준(80.6%, 89.6%)으로 제거되고, 화학응집법에 의해서도 유입 공정농도가 높을 경우(> 1 µg/L) 80% 이상의 높은 제거율을 나타내는 것을 알 수 있었다.

3.2.5. 다이옥신류(PCDDs/Fs) 제거율

김현구 등(2002)<sup>22)</sup>은 45개 정수처리장에서의 다이옥신류의 제거율을 조사한 결과 수처리공정을 통해서 다이옥신이 93% (총농도 기준)로 효율적으로 제거된다고 보고했다. 본 연구에서는 9개 산업폐수처리장의 처리공정을 통한 다이옥신류의 제거율(총농도 기준)은 10~99%의 범위를 보였다(Fig. 6). 그룹 1(NC, GJ, DA, DS)의 폐수처리장들은 제거율이 낮으나(10~31%), 그룹 2(YS, UG 제외)의 폐수처리장은 제거율이 높다(99% 이상). 이는 화학적 처리법과 생물학적 처리법만을 선택적으로 적용하고 있는 그룹 1에 비해 그룹 2의 폐수처리장들은 화학적 처리법과 생물학적 처리법 외에 사여과(SF)의 처리공정을 택하고 있어 용존상보다 주로 입자상의 물질에 흡착되어 거동하는 다이옥신류의 특성<sup>22)</sup>에 의해 제거율이 높은 것으로 판단된다. 그러나 사여과 공정을 택하고 있는 YS과 UG 폐수처리장에서 제거율이 상대적으로 낮은(12%, 48%) 것은 그룹 2의 타공단에 비해 유입수 내의 다이옥신류의 농도가 낮은(약 1% 수준) 것에 기인하는 것으로 사료된다.

이상의 결과로 볼 때 실제 혼합폐수 내에서의 다이옥신류의 제거에 있어서는 입자상 물질을 크게 제거할 수 있는 공정인 사여과(SF)가 효율이 가장 뛰어나다는 것을 알 수 있었

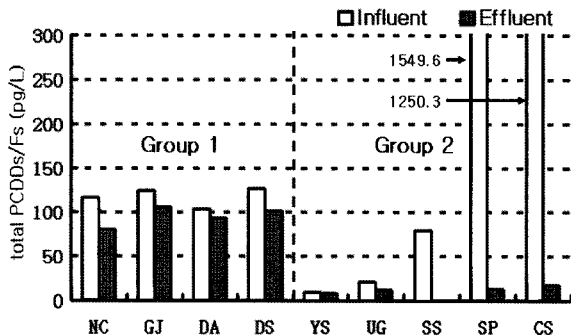


Fig. 6. Concentration variation of PCDDs/Fs in 9 WWTPs.

다. 하지만 사여과 공정에서도 유입수의 농도가 낮은 경우에는 제거율이 높지 않았다.

4. 결론

낙동강 수계 9곳의 산업폐수처리장을 대상으로 각 폐수처리장 유입수와 방류수 및 공정별 처리수 내의 1,4-다이옥산, 페놀류, 클로로벤젠류, 다환방향족탄화수소류, 다이옥신류의 미량유해물질을 분석해 폐수처리장을 통해 수계로 방류되는 미량유해물질의 현황과 처리공정별 미량유해물질의 제거율을 조사하고자 시도하였다.

1) 산업 폐수처리장 최종 방류수를 통해 낙동강 수계로 배출되는 미량유해물질의 농도수준은 1,4-다이옥산과 페놀류의 경우 기준치 이하로 검출이 되었으며, 클로로벤젠류, 다환방향족탄화수소류는 국내 수질기준이 마련되지 않아 직접적인 비교는 할 수 없지만, 국내의 기존연구에서 보고된 농도수준에 비해서는 낮은 수치를 보였으며, 다이옥신류는 일본의 방류수 수질기준에 비해 낮은 것으로 나타났다.

2) 산업폐수처리장의 처리공정에 따른 제거율은 1,4-다이옥산의 경우 가압부상/화학응집 처리공정, 활성탄흡착 처리공정에 의해 80% 이상의 높은 제거율을 보였고, 페놀류와 다환방향족탄화수소류는 생물학적 처리공정에 의하여 페놀은 94.6%, 클로로페놀류는 66.4%, 다환방향족탄화수소류는 80.6%의 높은 제거율을 보였다. 그러나 클로로벤젠류는 표준활성슬러지법과 활성탄흡착에 의해 각각 45.3%, 60.6%가 제거되었으나, 기타 처리공정으로는 거의 제거되지 않거나 제거율이 낮았다(< 20%). 또한 다이옥신류는 입자상 물질을 크게 제거할 수 있는 공정인 사여과(SF)가 효율이 가장 뛰어났지만(99% 이상) 유입수의 농도가 낮은 경우에는 제거율이 높지 않았다(50% 이하).

향후 본 결과를 바탕으로 보다 많은 시료와 다양한 미량유해물질을 대상으로 처리공정의 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)을 고려한 시료채취를 수행하여 처리공정에 따른 미량유해물질별 제거율을 평가하고자 한다.

사 사

본 연구는 낙동강수계 2005년도 환경기초조사사업의 일환으로 국립환경과학원 낙동강 물환경연구소의 지원에 의해 시행된 산업폐수의 미량유해물질 최적관리방안에 관한 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 국립독성연구원 홈페이지, <http://kntp.nitr.go.kr>, July(2006).
2. U.S. Environmental Protection Agency Home page, <http://www.epa.gov>.

3. 박선구, 김성수, 고오석, 정성용, 박준대, 유승도, 류재근, 조현우, "업종별 유해성 유기물질의 확인에 대한 연구," *Analytical Science & Technology*, **9**(4), 392~398(1996).
4. 박정규, 이희선, 잔류성 유기오염물질(POPs)의 관리현황과 대응방향-부산물 중심으로-, 한국환경정책·평가연구원 연구보고서(2000).
5. Snyder, S. A., Westerhoff, P., Yoon, Y. M., Sedak, D. L., "Pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disruptors in water: Implications for the water industry," *Environ. Eng. Sci.*, **20**(5), 449~469(2005).
6. Daifullah, A. A. M., Girgis, B. S., and Gad, H. M. H., "A Study of the Factors Affecting the Removal of Humic Acid by Activated Carbon Prepared from Biomass Material," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **235**(1~3), 1~10(2004).
7. 강종민, 조인철, 송주영, "CWPO 공법을 이용한 1,4-다이옥산 폐수처리," 2005년 한국환경분석학회 추계학술대회 논문집, 부산대학교 인덕관, 부산, pp. 144~155(2005).
8. 국립환경과학원 홈페이지 보도자료, <http://www.nier.go.kr>, 수돗물에서의 미량유해물질 관리방안연구(I) 용역 결과(2006).
9. 국립환경과학원 홈페이지, <http://www.nier.go.kr>, July, 박선구, "물 중에서 1,4-dioxane의 분석방법 신뢰도 구축"(2000).
10. U.S.EPA method, <http://www.epa.gov>.
11. 국립환경과학원, <http://www.nier.go.kr>, 각국의 수질관련 기준 비교분석(2000).
12. 명승운, "산업폐수중의 염화페놀 측정," *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, **8**(1), 22~39(2005).
13. Capital Regional District, "Sannich Peninsula Treatment Plant Wastewater and Marine Environmental Program 2002 Annual Report," Canada, April(2003).
14. Nikolaou, A. D., Golfopoulos, S. K., Kostopoulou, M. N., Kolokythas, G. A., Lekkas, T. D., "Determination of volatile organic compounds in surface waters and treated wastewater in Greece," *Water Res.*, **36**(11), 2883~2890(2002).
15. EU REPORT, "Pollutants in urban wastewater and sewage sludge-final report," February(2001).
16. 이강진, 표희수, 유제강, 이대운, "다단계 필터시스템에서의 음용수 중 1,4-Dioxane 제거," *Analytical Science & Technology*, **18**(2), 154~162(2005).
17. 이완석, 정상욱, 박찬선, 윤병대, 김장억, 오희목, "복합 미생물제재를 이용한 염소화 페놀계 폐수의 생물학적 처리," *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **29**(2), 115~120(2001).
18. 이순영, 강기철, 원찬희, "Trametes sp.의 배지조건에 따른 페놀폐수의 처리특성," 대한환경공학회 2004 춘계학술연구발표회 논문집, 경성대학교, 부산, pp. 432~439(2004).
19. 윤조희, 정기홍, 김승현, 하성룡, "SBR/GAC-SBR공정을 이용한 2,4-DCP 함유 페놀폐수 처리," *한국불환경학회지*, **18**(5), 493~499(2002).
20. Marianna Czaplicka, "Sources and Transformations of chlorophenols in the natural environment," *Science of the Total Environment*, **322**(1~3), 21~39(2004).
21. Busetti, F., Heitz, A., Cuomo, M., Badoer, S., Traverso, P., "Determination of sixteen polycyclic aromatic hydrocarbons in aqueous and solid samples from an Italian wastewater treatment plant," *Journal of Chromatography A*, **1102**(1~2), 104~115(2006).
22. Kim, H. K., Hiroshi, M., Tohru, M., Tasuku, K., Yasumoto, M., "Removal efficiency and homologue patterns of dioxins in drinking water treatment," *Water Res.*, **36**(19), 4861~4869(2002).