

Characteristics of TOC in effluent discharge from public sewage treatment works in Korea

우리나라 공공하수처리시설의 TOC 배출특성 및 관리방안 연구

Dong-Hwan Jeong^{1*} · In-Cheol Choi¹ · Yangseok Cho¹ · Kyunghee Ahn¹ · Hyen-Mi Chung¹
Ohsang Kwon¹ · Hoowon Park² · Hyunsang Shin³ · Jin Hur⁴

정동환¹ · 최인철¹ · 조양석¹ · 안경희¹ · 정현미^{1*} · 권오상¹ · 박후원² · 신현상³ · 허진⁴

¹National Institute of Environmental Research · ²Greentech Environmental Consulting · ³Seoul National University of Science and Technology · ⁴Sejong University

¹국립환경과학원 · ²(주)그린텍환경컨설팅 · ³서울과학기술대학교 · ⁴세종대학교

Abstract : Under Korea's Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy amended in 2013, total organic carbon (TOC) is newly added as water quality parameter to assess organic pollution in water and aquatic ecosystem. To meet the TOC requirement and improve quality of effluent discharged into public watershed, it is also necessary to develop standards for TOC in effluent from public sewage treatment works (PSTWs).

In this study, we reviewed the characteristics and removal efficiency of TOC in influent and effluent of PSTWs. The study found that phosphorus treatment process removed not only soluble phosphorus but also a portion of TOC remaining after the secondary treatment process. TOC concentration in effluent from PSTWs operated in tandem with industrial wastewater treatment work was higher due to influx of insoluble substances from the industrial wastewater treatment work.

In order to lay a foundation for the management of TOC from PSTWs, it is necessary to carry out research on TOC from different perspectives. For example, studies on the generation mechanism of TOC and the impact of TOC on drinking water resources, assessment of effluent qualities through monitoring, and development of measures to control TOC for the preservation of aquatic ecosystem are needed.

Key words : Discharge characteristics, Effluent standard, Sewage treatment works, TOC

주제어 : 배출특성, 방류수 수질기준, 하수처리시설, 총유기탄소

1. 서론

현행 공공하수처리시설의 방류수 수질기준 중 유기물질은 BOD, COD 항목으로 관리하고 있으며 지금까지 BOD 중심의 오염물질 규제와 관리 및 환경기초시설에 대한 투자로 공공수역에서 BOD 농도는 감소하는 추세이나, 생분해성 유기물질 처리 위주의 정책에 따른 난분해성 유기물질

저감대책 미비와 도시화 산업화로 인한 비점오염원 증가를 포함한 외부 오염물질 유입 증가로 인해 COD 오염도는 정체되어 있거나 증가하는 추세이다(MOE, 2008; NIER, 2009). 또한 4대강 사업으로 인한 하천의 수리특성이 변화함에 따라 현행 BOD와 COD 중심의 공공수역 정책방향에 대한 수정 필요성이 지속적으로 제기되었다. 이에 따라 다양한 오염원에 대한 총유기탄소(Total organic carbon, TOC) 발생 및 배출현황 조사가 필요하고 공공수역에서의 목표수질 달성을 위한 방안을 마련하는 것이 필요하며, 공공수역의

• Received 14 October 2014, revised 25 November 2014, accepted 28 November 2014.

* Corresponding author: Tel : +82-32-560-8340 E-mail : hyenmic@me.go.kr

주된 오염원으로 작용하는 공공하수처리시설의 방류수 TOC 현황에 대한 파악 및 기준설정, 그리고 기준 달성을 위한 노력이 시급한 시점이다.

공공하수처리시설의 방류수 수질기준 중 유기물질 관리지표 항목인 BOD와 COD는 수체의 탄소량을 산소 소모율로 환산하여 간접적으로 측정하는 방법이고, TOC는 유기탄소량을 직접 측정하여 오염 여부를 나타내는 것으로 기존 생분해성 물질 위주의 유기물 관리정책을 보완하고 수생태계 내에서 난분해성 물질을 포함한 유기물질이 공공수역에 미치는 영향을 직접적으로 평가하는데 사용될 수 있다(Leenheer and Croue, 2003; Visco et al., 2005). 분석에 고가의 측정 장비와 전문 인력이 필요하다는 단점이 있으나 측정 분석에 필요한 시간을 단축함으로써 실시간 오염원 감시 및 대응이 가능하고 정수과정에서 발생하는 트리할로메탄 전구물질을 제어하고 응집효율을 증가시켜 정수비용을 절감하는 등의 효과가 있다(Minear and Amy, 1996; Panyapinyopol et al., 2005).

환경부에서는 2012년 공공수역 유기물질 관리 지표항목으로 TOC 항목을 선정하고 관리기준(안)을 마련하였으며, 2015년 이후 방류수 수질기준, 배출허용기준, 수질오염총량관리 목표수질 관리항목으로 정하기 위한 정책을 추진하고 있다(MOE, 2012a). 수질오염총량관리 제도에서 TOC 항목을 목표수질 기준으로 도입하기 위한 연구와 함께 유기물질 관리지표 선진화 방안이 마련되었으며(NIER, 2011; NIER, 2012) TOC 항목을 환경기준으로 도입하기 위한 환경정책기본법 시행령을 시행하였다(MOE, 2013a).

따라서 본 연구에서는 공공수역 수질보전을 위해 공공수역에 수질에 영향을 미치는 주요 오염원의 하나인 공공하수처리시설에 대한 TOC 배출특성을 조사하였고, 외국의 방류수 수질기준 조사, TOC 수질기준 설정 등 관리방안에 대해 고찰하였다.

2. 연구방법

2.1 조사대상

본 연구에서는 조사대상 공공하수처리시설 선정 시 전수조사를 보완할 수 있도록 처리시설 규모, 처리공법, 인처리시설 유무, 산업폐수 처리 연계처리 등을 고려하여 적용하였다. 전국 공공하수처리시설은 2011년 하수도통계(MOE, 2012b)를 토대로 중·대규모(500 m³/일 이상) 시설 505 개소, 소규모(500 m³/일 미만) 시설 2,858 개소로 전체 3,363 개소를 대상으로 분류하였다. 조사대상은 500 m³/일 이상 하수처리시설 60 개소, 500 m³/일 미만 하수처리시설 50 개소 총 110 개소를 선정하였다(Table 1, Fig. 1). 본 연구는 처리효율 분석 및 유입수 특

Table 1. The investigation status of public sewage treatment works(PSTWs)

Total	Above 500 m ³ /day facility capacity					Below 500 m ³ /day facility capacity
	Sum	I Area	II Area	III Area	IV Area	
110	60	10	20	23	7	50

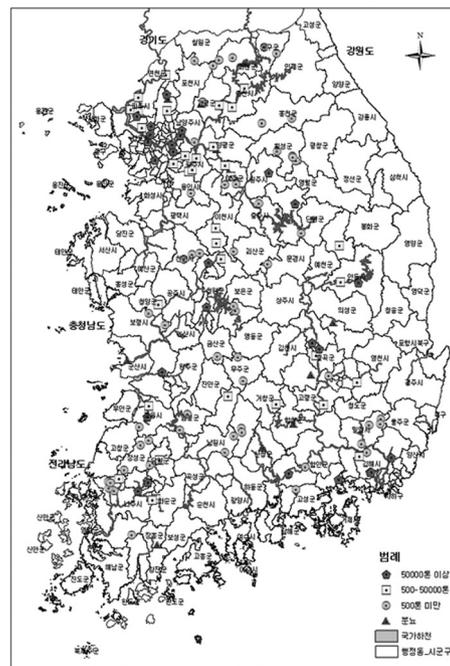


Fig. 1. Map of investigation sites.

성 등을 검토하기 위하여 유입수 및 방류수, 연계혼합수를 채수하였고 총인처리시설의 유입수도 추가적으로 채수하여 생물학적 처리공정과 물리화학적 처리공정에 대한 처리효율을 효과적으로 검토하도록 하였다.

2.2 조사방법

TOC 방류수 규제기준 설정을 위한 국내외의 TOC 관리 기준설정 관련 문헌 및 사례조사를 통해 외국에서의 유기물질 관련 방류수 수질기준 현황과 수질기준 설정 현황자료 수집하여 비교 분석하였다. TOC 규제기준과 관련한 조사는 on-line 및 국내에서 연구된 TOC 규제기준 관련 보고서 내용 및 문헌자료를 중심으로 자료를 조사하였다. 또한 미국, 일본, 유럽 등 선진외국에서의 유기물질 관련 방류수 수질기준 설정 근거(모니터링, 분석, 환경기준, 평가방법 등)와 설정체계에 대한 국내외 연구보고서 조사를 통해 관련 기준설정 방법론 사례를 조사하였다.

2013년 분류기준에 의해서 선정된 대상시설인 500 m³/일 미만 공공하수처리시설 50 개소, 500 m³/일 이상 공공하수처리시설 60 개소의 유입수와 방류수 시료를 채취하였다. 조사항목은 TOC, DOC, BOD₅, COD_{Cr}, COD_{Mn}, SS, TN, TP, 수온, pH로 총 10 항목이며 발생오염원 혹은 처리시설별 특성에 따른 중요성을 고려, 공공하수처리시설의 경우 8 항목을 기본 분석항목으로, TN 및 TP의 처리효율 등 추가적인 검토를 위하여 10 항목을 분석하였다. 계절별 특성을 고려하여 총 3회 조사를 실시하였다(2013년 1회 5 ~ 7월, 2회 9 ~ 10월, 3회 11 ~ 1월). 본 논문에서는 방류수 수질기준 항목인 TOC를 중심으로 BOD 및 COD_{Mn}와의 관계에 대해 주로 설명하였다.

2011년 공공하수처리시설 운영 실태조사(MOE, 2012c) 자료분석을 통한 처리시설별 유기물 처리효율 평가를 수행하였고 처리시설의 규모, 연계대상 오염물질의 종류 및 처리공법별

유기물 처리효율 분석을 통해 운영실태를 분석하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 외국의 하수처리시설 방류수 TOC 기준 관리현황

TOC와 관련된 국외 방류수 수질기준 현황조사 결과 EU, 미국, 독일에서 하폐수 처리장 방류수 수질기준으로 TOC를 적용하는 규정은 있으나 규제항목 보다는 관리 또는 평가항목으로 주로 사용되고 있으며 자동화가 가능하고 측정값에 대한 신뢰도가 높다는 장점과 COD_{Cr} 측정시 발생하는 2차 오염물질인 크롬에 대한 규제 강화 등의 영향으로 TOC를 수질 관리항목으로 선호하는 경향이 있다.

유기물질 관련한 EU의 법은 먹는물 취수를 위한 지표수 관리지침(75/440/EEC), 먹는물 관리지침(80/778/EEC), 도시 하·폐수처리 지침(91/271/EEC) 등이 있는데, TOC 항목을 사용하도록 되어 있으나 제시된 값은 없다. 도시 하·폐수처리 지침의 경우 다음과 같은 한계값(Limit value)를 제시하고 있으며, TOC의 경우 BOD 항목과 상관관계가 성립되는 경우에 한하여 BOD를 대체하여 사용하는 것이 가능하도록 규정하고 있다(Table 2).

Table 2. Recommendation values for BOD and COD

Items	Limits	Minimum removal efficiency
BOD ₅ ^a	Not to exceed 25 mg/L O ₂	70 ~ 90%
COD _{Cr}	Not to exceed 125 mg/L O ₂	75%

^a BOD₅ can be replaced by TOC if a relationship can be established between BOD₅ and TOC in the plant.

※ Source : Council directive of urban wastewater treatment (91/271/EEC)

독일의 물관리 및 규제와 관련한 연방법으로는 가장 상위법인 연방물관리법(Federal Water Act, WHC)이 있으며 지표수보호령(Ordinance on surface waters, OGewV), 폐수관리령(Wastewater ordinance, AbwV) 등을 규

Table 3. Regulation of TOC in river for LAWA*

Parameter	I	I ~ II	II	II ~ III	III	III ~ IV	IV
Pollution level	Very low pollution	Low pollution	Moderate pollution	Critical pollution	Severe pollution	Very severe pollution	Excessive pollution
BOD(mg/L)	Not to exceed 1	1 ~ 2	2 ~ 6	5 ~ 10	7 ~ 13	10 ~ 20	Above 15
TOC(mg/L)	≤2	≤3	≤5	≤10	≤20	≤40	Above 40

※ Source : The Federal Environmental Agency, 2001.

* LAWA : Bund/Laender-Arbeitsgemeinschaft Wasser (Eng. The German Group on water issues of the Federal States and the Federal Government)

Table 4. Secondary treatment standards for publicly owned treatment works(POTWs) in USA

Parameter	30-day average	7-day average
BOD ₅ ^a	30 mg/L (25 mg/L CBOD ₅)	45 mg/L (40 mg/L CBOD ₅)
Removal efficiency	85% BOD ₅ (or CBOD ₅) and TSS	-

^a TOC may be substituted for BOD₅ when a long-term BOD:TOC correlation has been demonstrated.

※ Source : USA, 1984, 40 CFR 133.102 and 133.104(b).

정하고 있다. 이중 폐수관리령에서는 수체내로 폐수를 배출 및 방류를 허가할 때 적용하도록 57개 업종에 대해서 배출규모에 따라 배출허용 기준(기본항목 COD, BOD₅, NH₄-N, TN, TP)을 제시하고 있다. TOC와 관련하여 폐수관리령 제6조(Compliance with the requirements)에서 폐수 배출허용기준으로 지정된 COD 값은 mg-C/L 단위로 표시된 TOC의 4 배를 초과되지 않았을 때 기준을 달성한 것으로 간주된다고 규정하고 있다. 한편, 독일에서는 연방과 주간의 물관리와 물에 대한 법제정, 갈등 등 다양한 이슈들을 원만하게 해결하고 조정하기 위하여 연방·주정부간 물관리 위원회(Bund/Laender-Arbeitsgemeinschaft Wasser, LAWA*)을 설립하여 운영하고 있으며, 이 위원회에서는 하천에서 TOC 항목을 물리·화학적 평가항목으로 선정하여 관리하고 있다.

미국의 모든 오염원에 대한 규제를 수행하는 NPDES(National Pollutant Discharge Elimination System) 제도에서는 TOC가 구체적으로 언급되고 있지 않다. 그러나 미국 연방법(Code of Federal Regulations, CFR)에 근거한 방류수 가이드라인 및 기준(Effluent Guidelines and Standards) 중 폐수배출산업 분류체계에 총 56개 산업업종 및 업종별 503개

세 분류에 대한 기준을 마련하고 있다. 이중 몇 개의 업종에 대해서는 COD 대신에 TOC를 대체 사용할 수 있는 조항을 가지고 있다(USA, 1984). 미국의 폐수배출산업 분류체계 구분 중 석유정제산업의 경우 염화이온이 1,000 mg/L 이상인 경우에는 COD 대신에 TOC로 대체 가능하며, BOD₅에 대해서는 상관관계가 성립되는 경우 TOC/BOD₅ 비율을 2.2로 한다는 예외조항이 포함되어 있어 TOC 사용이 가능하다(USA, 1982).

3.2 하수처리시설 TOC 배출특성 분석

수질 및 수생태계 환경기준의 유기물질 지표항목으로 TOC 기준이 추가됨에 따라서 공공수역의 TOC 목표기준 달성 및 수질관리를 위해서는 하수처리시설의 TOC 규제가 뒷받침되어야 한다. 이를 위해서 본 조사 대상시설로 선정된 하수처리시설의 TOC 배출특성 및 처리효율을 평가하여 현재 공공하수처리시설의 TOC 현황을 파악하고 합리적인 TOC 규제기준을 마련하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있도록 조사결과를 검토하였다.

처리시설별 유입수 및 방류수 TOC의 특성을 비교하여 처리효율을 평가하였고 오염물질 성상에 따른 TOC 배출특성을 검토하기 위하여 공공

하수처리시설의 경우 유입수 성상에 영향을 줄 수 있는 인자들을 고려하기 위하여 조사대상 시설 선정시 분류한 기준에 의해 유입 하수관거 형태, 처리공법, 방류수역 지역등급, 연계처리, 총인처리시설 설치에 따른 TOC 배출특성 및 처리 효율을 분석하였다.

3.2.1 하수 배제방식에 따른 TOC 배출특성

중대규모 공공하수처리시설의 경우 하수처리장의 유입관로의 형태가 합류식과 분류식에 따라서 유입수질 및 하수량이 큰 영향을 받게 된다. 본 연구에서 조사한 500 m³/일 이상 공공하수처리시설 중 합류식 하수관거로 하수가 유입되는 하수처리시설은 41 개소, 분류식 하수관거로 하수가 유입되는 하수처리시설은 19 개소이다. 하수관거 정비사업 등으로 많은 지역에서 분류식화가 이루어지고 있으나, 현장 조사결과 합류식의 분포 또한 상당함을 알 수 있었으며 하수관거에 따른 분류는 통계 및 기타 자료로 수치적으로 분리하기가 현실적으로 어렵고, 분류식화가 100% 진행된 곳에서도 강우에 의한 유입유량 및 수질이 크게 변하는 것을 고려하여 현장조사 시 이루어진 대면조사를 통한 분류에 기초하였다.

알려진 바와 같이 일반적으로 합류식 하수관거로 이루어진 유입수의 수질이 낮고 하수량이 많은 경향이 있으며 우수가 분리되어 유입되는 분류식 하수관거에서는 수질이 높고 하수량이 적은 경향을 나타내게 된다. 본 조사결과를 나타낸 Fig. 2에서도 유입수내의 TOC 및 BOD의 수질이 분류식 하수관거인 경우가 더 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 분류식 하수관거에서 발생하는 평균 TOC 농도가 76.6 mg/L로 합류식 하수관거 평균 TOC 농도인 70.5 mg/L 보다 다소 높은 경향을 나타내었다. 분류식 지역의 유입유기물 농도가 높고 방류유기물 농도가 낮게 나타난 이유는 합류식 지역의 경우 불명수 유입으로 인한 하수량 증가 및 유입하수 농도의 희석효과

과로 설명될 수 있으며 분류식 하수관거가 설치된 지역의 경우 하수관거 정비가 비교적 근래에 이루어지고 이에 따른 우수와 오수 분리로 인해 유입하수 농도 증가와 함께 TOC 농도 또한 증가한 것으로 판단된다.

공공하수처리시설의 분류식 하수관거 지역과 합류식 하수관거 지역에 설치된 처리시설에서 방류수의 평균 TOC 농도는 모두 5.8 mg/L로 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 분류식 하수관거 지역의 공공하수처리시설 방류수 TOC의 측정범위는 1.6 ~ 39.6 mg/L(N=57), 합류식 관거지역의 방류수 BOD의 측정범위는 0.2 ~ 39.9 mg/L(N=123)로 일부 처리장에서 기준을 초과하는 다소 넓은 범위에서 측정되었다(Fig. 2). 이는 TOC의 경우 분류식 하수관거지역에

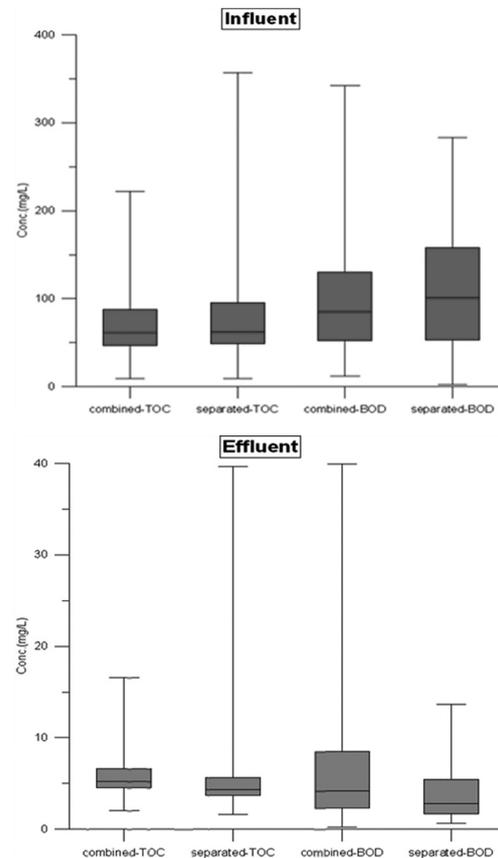


Fig. 2. TOC and BOD in influent to and effluent from PSTWs above 500 m³/day facility capacity according to sewer system types.

서 SBR 공법을 적용하고 있는 G 하수처리장(춘천, '13.11 ~ '14.1), BOD의 경우 합류식 하수처리지역에서 A2O 공법을 적용하고 있는 K 하수처리장(광주광역시, '13.5 ~ '7)에서 최대값으로 나타나 생물학적 처리공정 및 동절기에 효율적으로 운영·관리하는 것이 필요하다(Fig. 2). 유입수 및 방류수 모두 BOD에 비해 TOC의 25 ~ 75% 농도 범위가 좁아 데이터의 변동이 작게 나타났는데 BOD는 생분해도 영향으로 범위가 큰 것에 비해서 TOC는 유기탄소를 직접 측정하므로 범위가 좁게 나타난 것으로 판단된다. 이는 비교적 처리효율이 높은 MBR 공법 등의 처리공법을 적용하여 고농도로 유입되는 TOC를 안정적으로 처리하기 때문으로 판단된다.

앞에서 TOC와 BOD의 설명에서는 하수배제 방식을 고려하였으나 COD_{Mn}의 설명에서는 하수배제 방식을 고려하지 않고 모든 측정자료를 활용하여 설명하였다(Fig. 3). 하수처리시설 방류수에서는 TOC의 평균농도가 5.8 mg/L(1.6

~ 39.6 mg/L), COD_{Mn}의 평균농도가 6.9 mg/L(0.2 ~ 35.2 mg/L)로 나타났으며 유입수에서는 TOC의 평균농도가 72.0 mg/L(9.2 ~ 357.2 mg/L), COD_{Mn}의 평균농도가 51.2 mg/L(3.8 ~ 583.3 mg/L)로 나타나 COD_{Mn}/TOC의 비가 0.95 ~ 1.3 정도라는 외국 연구와 다른 결과가 도출되었는데 유입하수 및 방류수 특성 등 다양한 측면에서 검토가 필요한 것으로 보인다(NIER, 2012). 또한 하수처리시설의 방류수에서 이들 항목의 최대값이 매우 높게 나타났는데 생물학적 처리공정 개선 및 동절기 효율적인 운영·관리 등이 필요하다고 판단된다.

3.2.2 하수 처리공법에 따른 TOC 배출특성

500 m³/일 미만 공공하수처리시설의 공법별 유입수 및 방류수 TOC 검토 결과는 Fig. 4과 같다. 500 m³/일 미만 공공처리시설의 공법별 유입수 TOC 경향은 500 m³/일 이상 시설과 달리 공법에 따른 차이가 나타나지 않는 것을 알 수 있는데 3회 전체 조사결과를 반영한 것으로 개별 회차 조사결과 분석에서도 유사한 경향을 나타내었다.

방류수 TOC의 결과는 공법분류에 따른 차이가 크지 않았는데, TOC 평균 처리효율로 비교하면 A₂O 공법 80.0%, MBR 공법 83.2%, Media 공법 78.6%, SBR 공법 72.8%의 처리효율을 보여 근소하지만 MBR 공법의 TOC 처리효율이 우수한 것을 알 수 있다. 500 m³/일 미만 공공하수처리시설의 공법별 처리효율 분석결과 최소 및 최대 편차가 큰 것으로 조사되었으며 이는 공법에 따른 특성보다는 500 m³/일 미만 처리시설의 특성상 운영 및 유지관리 상태에 의존하기 때문으로 판단된다(Table 5).

500 m³/일 이상 공공하수처리시설의 공법별 유입수 및 방류수 TOC 검토결과는 Fig. 4과 같으며 그림과 같이 유입수의 TOC는 MBR 공법에서 높은 경향을 나타내었는데, 이는 유입수질이 높은 경우 고농도 수질의 처리 안정성을 위해

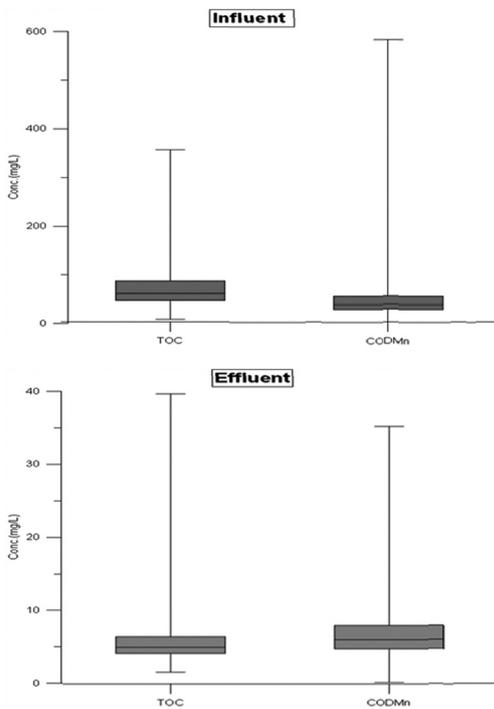


Fig. 3. TOC and COD_{Mn} in influent to and effluent from PSTWs above 500 m³/day facility capacity.

Table 5. The removal efficiency of TOC from PSTWs according to treatment methods

Classification		Total	A/S method	A ₂ O method	MBR method	Media method	SBR method	Others
Total		110	4	40	16	31	18	1
Above 500 m ³ /day facility capacity	Count	60	4	26	4	18	7	1
	TOC removal(%)	-	-	80.0 (22.2 ~ 99.1)	83.2 (54.1 ~ 99.3)	78.6 (12.7 ~ 99.1)	72.8 (15.0 ~ 94.1)	-
Below 500 m ³ /day facility capacity	Count	50	-	14	12	13	11	-
	TOC removal(%)	-	-	87.5 (81.3 ~ 96.9)	90.1 (64.5 ~ 96.8)	93.7 (88.9 ~ 98.9)	88.9 (50.0 ~ 96.8)	-

※ A/s method : Activated sludge method, A₂O method : Anaerobic-anoxic-aerobic method, MBR method : Membrane bioreactor method, SBR method : Sequencing batch reactor method.

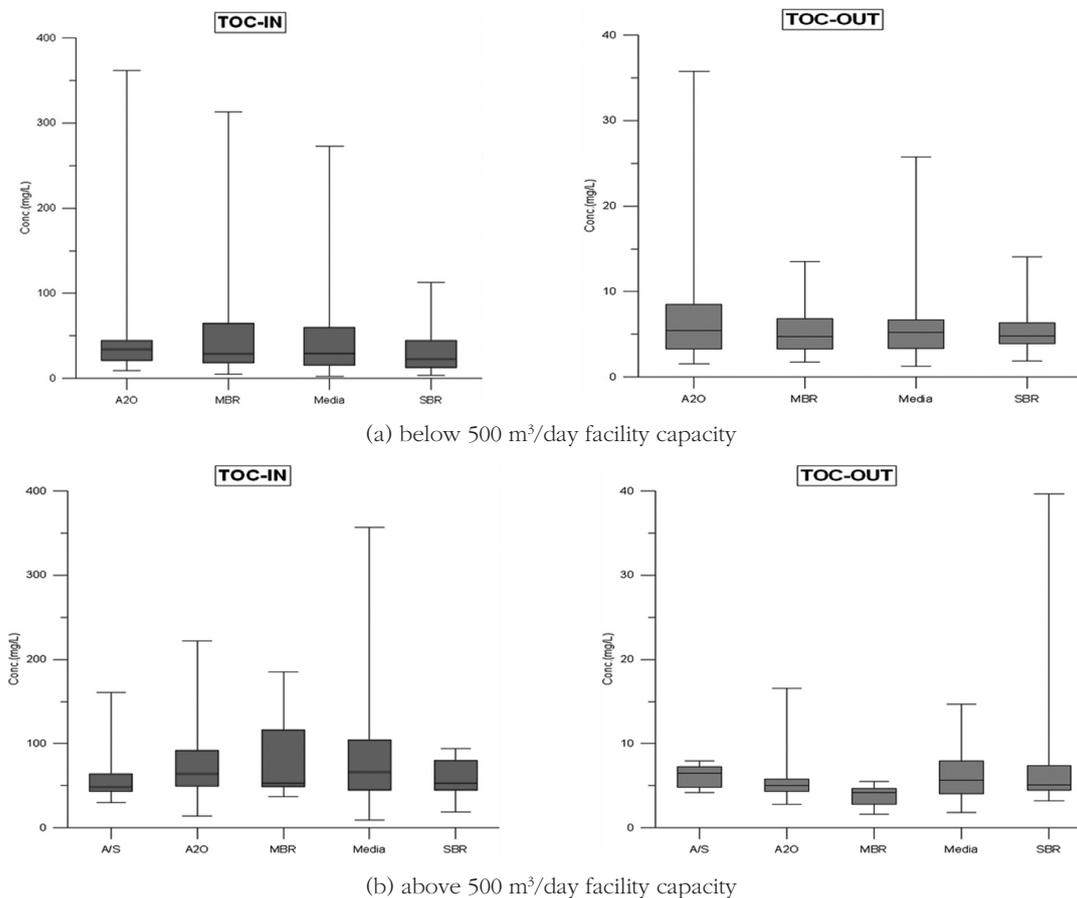


Fig. 4. TOC in influent to and effluent from PSTWs according to treatment methods.

MBR 공법이 적용되는 경향이 나타난 것으로 판단된다. MBR 공법은 최근에 그 적용비율이 높아졌고, 그로 인해 처리분구의 분류식화 비율이 높아짐에 따라 유입수내 고농도 유기물이 조사된 것으로 사료된다. 특히 MBR 공법의 유입수

평균 TOC 농도가 가장 높은 80.6 mg/L로 조사되었고, 방류수 TOC의 경우 반대로 동일 공법계열에서 가장 낮은 3.8 mg/L로 조사되었다. 이러한 결과는 MBR 공법이 도입된 하수처리지역이 다른 공법계열의 하수처리지역에 비해 최

근 하수관거 정비로 분류식화가 이루어져 유입수 TOC 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 반응조 내 7,000 ~ 10,000 mg/L의 고농도 미생물을 확보할 수 있어 방류수 TOC 농도를 낮은 수준에서 안정적으로 달성할 수 있었다. Table 5와 같이 TOC 처리효율 검토결과 A₂O 공법, SBR 공법보다 MBR 공법의 처리효율이 높은 것으로 나타나 MBR 공법이 처리 안정성이 높은 것으로 판단된다.

3.2.3 지역구분에 따른 TOC 배출특성

공공하수처리시설의 방류수역 등급에 따라서 TOC 발생특성을 검토하기 위하여 지역등급으로 나누어져 있는 500 m³/일 이상 공공하수처리시설의 유입수 및 방류수 TOC 결과를 검토하여 Fig. 5에 나타내었다.

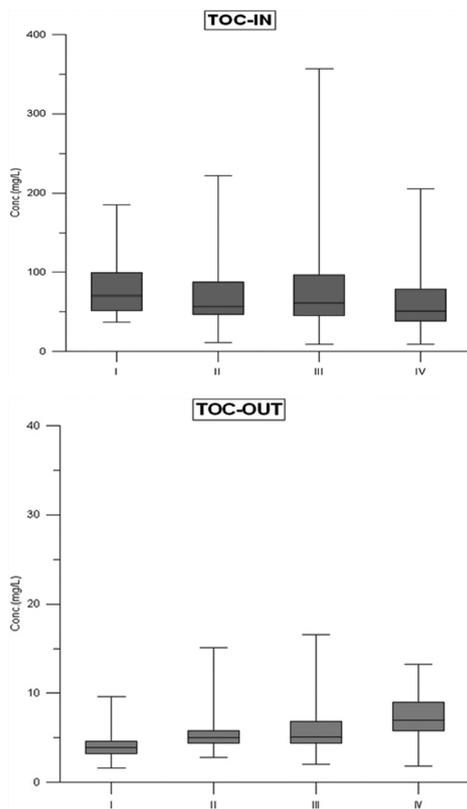


Fig. 5. TOC in influent to and effluent from PSTWs above 500 m³/day facility capacity according to the area grade of receiving watershed.

유입수 TOC의 경우는 지역에 따른 영향이 의미가 없고 또한 방류수역 지역등급에 따른 경향성이 나타나지 않았으나 방류수 내 TOC 결과를 살펴보면 I 지역 평균 4.1 mg/L, II 지역 6.1 mg/L, III 지역 6.1 mg/L, IV 지역 7.0 mg/L로 나타나 방류수역 등급별로 차이가 나타남을 알 수 있다. 방류수역의 총인 기준이 엄격한 지역일수록 TOC 농도가 낮은 것으로 보아 이는 엄격한 방류수 수질기준 지역일수록 운영관리에 중요성을 두기 때문에 법적기준에 따른 수질개선 효과가 발생한 것으로 판단된다. 또한 I ~ III 지역 일수록 25 ~ 75% 범위가 좁게 나타났다.

3.2.4 연계처리에 따른 TOC 배출특성

연계처리수는 유입수 특성을 나타내는데 큰 영향을 줄 수 있으므로 유입수뿐만 아니라 연계처리 혼합수를 채취하여 분석하였으며 이에 따른 TOC 발생을 검토하였다. Fig. 6은 공공하수처리시설의 유입수질에 영향을 미치는 연계처리수의 유무에 따른 TOC 배출특성을 검토한 결과를 나타낸 것으로 연계처리수의 종류는 분뇨, 가축분뇨, 침출수 등이 있으나, 연계량에 따른 유입수내 TOC 배출특성을 표현하기에는 연계율이나 연계방법에 따른 차이로 인해 현실적으로 불가능한 상황이므로 연계처리 여부에 따른 결과만을 표현한 것이다.

산업폐수는 산업단지 내의 처리시설에서 처리되고 있으나 일부 산업폐수가 공공하수처리시설로 유입되고 있으며 이에 따라서 유입수 특성이 달라질 것으로 판단되어 '2011년 전국오염원조사' 자료를 기초하여 본 연구의 조사대상 시설 중 산업폐수가 유입되고 있는 처리시설을 검토하였다. 그 결과 500 m³/일 이상 공공하수처리시설 60 개 중 19 개소로 32%에 해당되는 처리시설에 산업폐수가 유입되고 있다.

연계처리하는 경우 유입수 및 연계처리 혼합수를 채취하였는데 연계처리수가 있는 유입수의 농도는 연계처리가 없는 유입수 농도에 비해 중

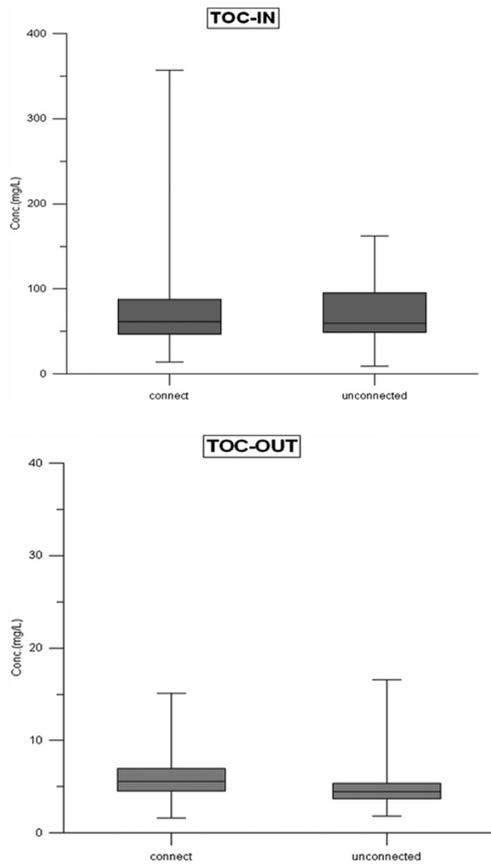


Fig. 6. TOC in influent to and effluent from PSTWs above 500 m³/day facility capacity connected or unconnected to industrial wastewater plants.

간농도는 유사하지만 농도 분포가 높은 경향을 나타냈으며 편차 또한 매우 커 운영관리시 주의가 요구되는 것으로 판단된다(Fig. 6). 공공하수처리시설 운영관리 업무지침(MOE, 2013b)에 따르면 가축분뇨, 분뇨 및 음식물 처리시설 배출수 등을 연계처리해야 하는 경우 전처리수의 오염부하량도 공공하수처리시설의 정상운영에 영향을 주지 않도록 총질소 및 총인의 오염부하량은 설계시 유입하수 오염부하량의 10% 이내까지 전처리한 후 연계처리하도록 규정하고 있다. 이러한 근거로 미루어 볼 때 정상적인 운영이 이루어지고 있는 처리시설의 경우 연계처리에 따른 유입수 부하 증가율은 제한적이거나 영향이 크지 않을 것으로 판단되지만, 연계방식에 따른 충격부하에 대한 검토는 신중한 고려가 필요할 것

으로 판단된다.

연계처리가 있는 처리시설 유입수 TOC의 편차는 동일 시설에 대한 조사시기별 농도변화를 분석한 결과 일시적인 현상으로 나타났다. 이러한 결과를 살펴볼 때 단순히 연계처리 유무에 따라 농도 편차가 발생하기 보다는 하수 원수의 농도, 연계처리 유입수 수질 및 연계처리 비율에 따라 차이를 보이는 것으로 판단된다. 한편 방류수 TOC 결과는 연계처리수가 없는 처리시설의 방류수 농도가 낮고, 처리효율이 상대적으로 안정적인 것으로 조사되어, 연계처리하는 공공하수처리시설의 경우 연계처리에 따른 난분해성 물질의 유입으로 인해 방류수 TOC 농도가 높은 것으로 사료되었다.

3.2.5 인처리시설에 따른 TOC 배출특성

Fig. 7은 조사대상 공공하수처리시설의 총인 처리시설 설치에 따른 방류수 TOC 분석결과를 검토한 결과를 나타낸 것으로 조사대상 110 개소 공공하수처리시설에서 조사대상 500 m³/일 이상 공공하수처리시설 60 개소 중 인처리시설은 44 개소에 설치되었으며 미설치된 시설이 16 개소이다.

방류수 TOC 농도 분석결과 총인처리시설이 설치된 시설의 TOC 농도가 그렇지 않은 시설의

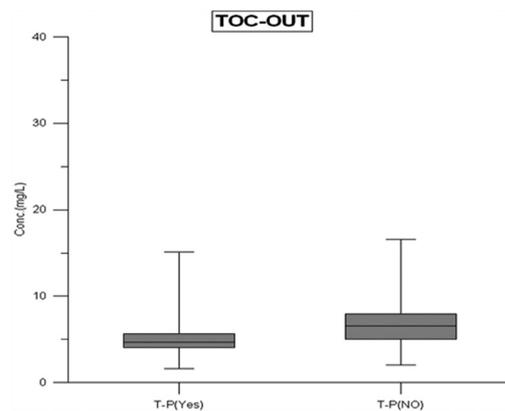


Fig. 7. TOC in effluent from PSTWs above 500 m³/day facility capacity with and without phosphorus treatment process.

농도에 비해 비교적 낮은 것으로 조사되었으며 TOC 농도 편차 역시 작게 나타났는데, 처리과정에서 유입수 대비 약 5.8%의 TOC를 추가 저감되는 것으로 나타났다. 이는 인처리시설이 설치되지 않은 하수처리시설의 경우 대부분 IV 지역에 해당되므로 유기물질에 대한 방류수 수질기준이 상대적으로 높게 정해져 있어 비교적 높은 농도의 방류수 내 TOC가 검출된 것으로 판단되며 인처리시설이 설치된 하수처리시설에서는 SS 등 추가 제거가 되므로 방류수 내 TOC 농도 저감에 일정 부분 기여하였기 때문으로 판단된다.

3.3 하수처리시설 TOC 관리방안 고찰

자연상태의 유기물질은 소독과정에서 염소와 결합하여 소독부산물(Disinfection by-products, DBPs)을 생성하여 인체에 유해한 물질을 생성하는 원인물질이다. 또한 색도와 이취미를 유발하고 처리를 위한 응집제와 소독제의 양을 증가시키면서 다량의 슬러지를 발생한다. 유기물질은 박테리아 등 미생물의 성장에 기여하고 중금속과 흡착하여 인체에 유해한 물질을 생성한다. 이러한 영향을 미치는 유기물질은 BOD 및 COD 분석방법을 통해 산소 소모량으로 간접적으로 유기물질 농도를 측정하였으나 TOC 분석방법은 직접 유기물질(탄소)을 측정하여 농도를 알 수 있다. 이러한 TOC 항목을 도입함으로써 그 동안 배출원 관리에서 제외되었던 난분해성 및 미량유기물질을 관리대상으로 포함시켜 배출원 특성에 따라 신속하고 빠른 유기물질 측정 자료를 제공하고 데이터 분석에 대한 평가 및 검토가 용이해 진다. 또한 TOC 항목을 하수처리시설 방류수 수질기준으로 도입하는 것은 농도 측정 시 자동화가 가능하고 측정값에 대한 신뢰도가 높다는 장점이 있으며, COD_{Cr} 측정 시 발생하는 2차 오염물질인 Cr에 대한 규제 강화 등의 이유로 TOC 항목을 선호하는 경향이 있다.

독일 등 EU에서는 TOC를 환경기준으로 이미

도입하고 있는데, 우리나라는 수질 및 수생태계 환경을 유지하기 위해 2013년부터 하천 및 호소의 생활환경기준에 TOC를 도입하였다. 이들 국가에서 하수처리시설에 대한 방류수 TOC 기준치를 제시하지 않고 있더라도 우리나라 공공수역에서 수질 및 수생태계 보호를 위해 수질측정망 운영계획(MOE, 2013c)에 중권역 목표기준을 설정하였고 이를 달성하기 위해 배출원 관리가 필요하다. 따라서 공공수역의 수질에 영향을 미치는 하수처리장 등 배출시설에 대한 효과적인 관리를 위해 아직 설정되어 있지 않는 하수처리시설 방류수 TOC 기준을 도입하는 것이 필요하다. 현재 가동되고 있는 공공하수처리시설을 대상으로 TOC 배출실태를 조사하여 방류수 수질기준 설정을 위한 근거를 마련하는 것이 바람직하다. 먼저 2013년 1년간의 조사결과를 바탕으로 하수처리시설 방류수의 TOC 기준설정 방법론을 검토하였는데 TOC 기준설정의 일환으로 백분위수(Percentile) 방법을 적용하였을 때 방류수역 등급을 고려하여 95번째 백분위수를 적용한다면 500 m³/일 이상 시설은 등급별로 5.7 ~ 12.0 mg/L, 500 m³/일 미만 시설은 8.6 ~ 12.8 mg/L TOC 농도가 산출되었다.

현행 유기물 방류수 수질기준과의 TOC 상관성 분석을 통한 연계성에 근거한 방법론에 대해서는 500 m³/일 공공하수처리시설 방류수 TOC와 BOD의 상관계수는 0.341로 상관성이 낮게 나타났으며 TOC와 COD_{Mn}의 상관계수가 0.691로 상관관계가 있는 것으로 나타났다(Table 6). 즉 TOC와 COD_{Mn}의 상관관계는 있으나 TOC와 BOD의 상관관계는 낮게 나타나 회귀분석을 통해 구해지는 관계식을 이용한 TOC 기준안의 설

Table 6. Correlation coefficient among TOC, BOD, and COD_{Mn} above 500 m³/day of facility capacity (60 plants)

Variables	Sampling Number	Correlation coefficient (Significant probability)	
		BOD	COD _{Mn}
TOC	540	0.341(0.000)	0.691(<0.0001)

정은 하수의 특성, 규모의 차이, 적용되는 처리 기술의 수준, 방류수 수질기준 지역등급 등을 고려하여 신중한 해석이 필요하고 하수처리시설에 대한 정밀조사를 통해 통계적 유효성을 파악하는 것이 필요하다고 판단되었다.

4. 결론

TOC를 유기물질 지표항목으로 사용하여 공공수역의 수질개선을 목표로 관리하는 방향은 간접적인 지표가 아닌 직접적인 지표로 수질오염 유기물질을 관리하고 오염물질의 다양성 및 난분해성 물질에 대한 대응이 가능하다는 측면을 지니고 있다. 우리나라는 2013년 「환경정책기본법 시행령」 개정을 통해 '수질 및 수생태계 환경기준'에 유기물질 지표항목으로 TOC를 설정하였고 공공수역에서 TOC 목표기준 달성 및 수질관리를 위해 하수처리시설에 대한 TOC 수질기준을 마련하는 것이 필요하다. EU, 미국, 독일 등 외국에서는 하수처리시설 방류수 수질기준으로 아직 TOC에 대한 수질기준을 따로 정하고 있지 않지만 개별 하수처리시설에서 BOD 등 유기물질 농도에 비례하여 설정할 수 있도록 하고 있다.

본 연구에서는 공공하수처리시설의 유입수 및 방류수에서 TOC 특성을 분석하고 처리효율을 평가함으로써 처리시설에 따른 합리적인 TOC 규제기준 적용을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다. 공공하수처리시설의 합류식 및 분류식 하수관거에서 유입수 TOC는 분류식 하수관거일 때 더 높은 경향을 나타내었고 반면 합류식 하수관거 지역의 TOC 농도가 분류식 지역보다 더 높고 편차 또한 큰 것으로 조사되었다. 처리공법별 TOC 분석결과에서는 500 m³/일 미만 공공처리시설의 유입수 TOC는 500 m³/일 이상 공공하수처리시설의 방류수 TOC 농도와 달리 처리공법에 따른 차이가 나타나지 않았다. 공공하수처리시설에서 방류되는 공공수역의 지역등급에 따라 방류수 TOC 농도는 총인 기준이 엄격한

지역일수록 TOC 농도가 낮게 나타났는데 공공하수처리시설 운영관리에 따라 수질개선 효과가 있는 것으로 판단되었다. 그리고 연계처리를 하지 않는 하수처리시설의 방류수 TOC 농도가 낮았고 처리효율이 안정적인 것으로 조사되었다.

따라서, 공공하수처리시설의 TOC 관리기반 마련을 위해서는 TOC 생성 및 원인물질, 모니터링을 통한 수질평가, TOC가 상수원 수질에 미치는 영향, 수생태 보전을 위한 TOC 관리방안 마련 등 다양한 관점에서 TOC와 관련된 조사·연구를 수행하는 것이 필요하다. 이를 통해 공공수역에 영향을 미치는 하수처리시설의 방류수 TOC 관리방안을 체계적으로 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Leenheer, J.A. and Croue, J.P. (2003) Characterizing aquatic dissolved organic matter, *Environmental Science and technology*, 37(1), pp.18A-26A.
- Minear, R.A. and Amy, G.L. (1996) Water Disinfection and Natural Organic Matter: Chapter 1. History and Overview, 649, pp.1-9, American Chemical Society, Washington, DC.
- Ministry of Environment(MOE) (2008) A study on policy direction of assessment and management in the public watershed.
- Ministry of Environment (2012a) Supplementary measures of environmental criteria for water qualities and water ecosystem(Healthy protection and TOC).
- Ministry of Environment (2012b) Statistics for sewer system in 2011.
- Ministry of Environment (2012c) Investigation of current operation and management for public sewage treatment works in 2011.
- Ministry of Environment (2013a) Implementation act of basic law for environmental policy.
- Ministry of Environment (2013b) Guidance manual of operation and management for public sewage treatment works.
- Ministry of Environment (2013c) The operation

- plan of national water quality survey networks.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2009) A study on nutrient management for discharge source and watershed management.
- National Institute of Environmental Research (2011) Analysis of environmental impact according to determining TOC limit for environmental criteria.
- National Institute of Environmental Research (2012) A study on basic plan in order to introduce regulatory TOC standard.
- Panyapinyopol, B., Marhaba, T.F., Kanokkattapong, V., Pavasant, P. (2005) Characterization of precursors to trihalomethane formation in Bangkok source water, *Journal of Hazardous Materials*, **B120**, pp.229-236.
- The Council of the European Communities (1975) Council directive of 16 June 1975 concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in the Member States (75/440/EEC).
- The Council of the European Communities (1980) Council directive of 15 July 1980 relating to the quality of water intended for human consumption (80/778/EEC).
- The Council of the European Communities (1991) Council directive of 21 May 1991 concerning urban wastewater treatment (91/271/EEC).
- The Federal Environmental Agency (2001) Environmental policy, water resources management in Germany.
- USA (1982) 40 The Code of Federal Regulation (CFR) Part 419. Petroleum refining point source category.
- USA (1984) 40 The Code of Federal Regulation (CFR) Part 133. Secondary treatment regulation, §§133.102 Secondary treatment and §§133.104 Sampling and test procedures.
- Visco, G., Campanella, L., Nobili, V. (2005) Organic carbons and TOC in waters: an overview of the international norm for its measurements, *Microchemical Journal*, **79**, pp.185-191.