



하수처리시설의 방류수 수질기준 설정방법 고찰 - TOC를 중심으로 -

A Study on the Determination Method of TOC Effluent Limitation for Public Sewage Treatment Plants

정동환¹·조양석¹·안경희¹·정현미¹·박후원²·신현상³·허진⁴·한대호^{5*}

Dong-Hwan Jeong¹·Yangseok Cho¹·Kyunghee Ahn¹·Hyen-Mi Chung¹·Hoowon Park²·Hyunsang Shin³·Jin Hur⁴·Daeho Han^{5*}

¹국립환경과학원, ²(주)그린텍환경컨설팅, ³서울과학기술대학교, ⁴세종대학교, ⁵한국환경정책평가연구원

¹National Institute of Environmental Research, ²Greentech Environmental Consulting,

³Seoul National University of Science and Technology, ⁴Sejong University, ⁵Korea Environment Institute

ABSTRACT

As the Enforcement Ordinance of Environmental Policy Act was revised in 2013, total organic carbon(TOC) was added as an indicative parameter for organic matter in Water and Aquatic Ecosystem Environmental Criteria. Under these imminent circumstances, a regulatory standard is needed to achieve the proposed TOC limitation control water quality from the public sewage treatment plants(PSTWs). This study purposes to present the determination method for TOC effluent limitation at the PSTWs. Therefore we investigate the TOC effluent limitation of foreign countries such as EU, Germany and USA, and analyse the effluent water qualities of PSTWs. In using these TOC data, we review apprehensively the statistics-based, the technology-based, and the region(water quality)-based determination method of TOC effluent limitation for PSTWs.

Key words: Compliance ratio, Determination method, Effluent limitation, Sewage treatment works, Total organic carbon

주제어: 달성률, 방류수 수질기준, 설정체계, 총유기탄소, 하수처리시설

1. 서론

급속한 산업발전과 도시화로 인한 개발사업으로 인해 발생한 오염물질로부터 수생태계의 수질관리에 대한 중요성이 더욱 부각되고 있다. 과거와는 달리 공공수역의 난분해성물질에 대한 사회적인 관심이 높아지면서 기존의 유기물질 관리지표로는 공공수역의 수질관리가 어려워짐에 따라 수질 및 수생태계 환경기준으로 2013년부터 총유기탄소(Total organic carbon, TOC) 항목을 도입하였다(MOE, 2013a). 이러한 공공수역의

목표 수질기준 달성을 위해서 공공수역으로 유입되는 주요 배출시설 중 하나인 하수처리시설에서 TOC에 대한 수질관리의 필요성이 대두되었다(MOE, 2012). 해외에서는 1960~1970년대부터 오염물질의 관리를 위한 TOC가 도입되고 지속적인 연구와 함께 현장에서는 조사 및 측정, 적용, 모니터링이 활발하게 이루어지고 있으며 규제기준으로 도입하려고 하고 있다(US EPA, 2010; EU, 1991; Germany, 2004)

2015년 이후 하수처리시설의 방류수 수질기준, 산업계 배출수 처리시설에 대한 배출허용기준, 수질오염총량관리 목표수질 등의 TOC 기준을 확대 반영하는 정책을 추진하고 있기 때문에 기존 처리시설의

Received 29 March 2016, revised 4 May 2016, accepted 9 May 2016

*Corresponding author: Daeho Han (E-mail: dhhan@kei.re.kr)

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 265-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

방류수 TOC 현황 파악을 통하여 현장 여건에 적합한 배출수 규제기준으로서의 TOC 관리방안이 필요하다. BOD, COD_{Mn}과 같은 기존 유기물 지표는 유기물을 생화학적 및 화학적인 방법으로 산화시키는데 필요한 산소요구량을 측정함으로써 수중에 존재하는 유기물 함량을 간접적으로 측정하는 한계를 지니고 있는 것에 반하여 TOC는 유기물 함량을 직접 측정함으로써 기존 생분해성 물질 위주의 유기물 관리정책을 보완하고 수생태계 내에서 난분해성 물질을 포함한 총유기물질이 공공수역에 미치는 영향을 직접적으로 평가하는데 활용하는 것이 가능하다(Leenheer and Croue, 2003; Visco *et al.*, 2005). 또한 TOC는 수체 내 난분해성 유기물질의 변화를 파악하고, 빠른 측정결과와 제공에 따른 실시간 오염원감시 및 대응이 가능하며, 염소 소독부산물물 사전에 검출하여 예방을 통한 건강위해성을 감소시키고 정수처리 비용을 줄여 준다(Minear and Amy, 1996; Panyapinyopol *et al.*, 2005). 그리고 COD_{Cr} 분석 시 발생하는 수은, 크롬, 망간 등에 의한 2차 오염 방지와 함께 2016년 예정된 국제 수은 협약 발효에 따른 수은 물질사용 제한에 대비하고, 기후변화에 따른 수체 내 유기물질의 생성여부를 파악함과 동시에 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해서 사용될 수가 있다(NIER, 2011).

본 연구는 국내 공공하수처리시설 여건에 적합한 TOC 방류수 수질기준을 마련하기 위한 국내·외 TOC 기준 설정 및 도입 사례를 검토하고 공공하수처리시설의 방류수 TOC 조사를 통하여 선진화된 방류수 TOC 기준 설정방법에 대해 고찰하였다.

2. 연구방법

2.1 외국의 방류수 TOC 기준 및 공공하수처리시설 방류수 수질 조사

공공하수처리시설 TOC 방류수 규제기준 설정을 위한 국내외의 TOC 관리 기준설정 관련 문헌 및 사례 조사를 통해 외국에서의 유기물질 관련 방류수 수질 기준 현황과 수질기준 설정과 관련된 자료를 수집하여 비교 분석하였다. TOC 규제기준과 관련된 조사는 on-line 및 국내에서 연구된 TOC 규제기준 관련 보고서 내용 및 문헌자료를 중심으로 자료를 조사하였다. 미국, 일본, 유럽 등 선진 외국에서의 유기물질 관련

모니터링, 분석, 환경기준, 평가방법 등 방류수 수질기준 설정 근거와 설정체계에 대한 국내·외 연구보고서 조사를 통해 관련 기준설정 사례를 조사하였다.

본 연구에서는 공공하수처리시설의 특성을 고려하여 조사대상을 선정하였다. 조사대상인 전국 공공하수처리시설은 2012년 하수도통계를 기준으로 500 m³/day 이상(중·대규모) 하수처리시설은 546개소, 500 m³/day 미만(소규모) 하수처리시설은 3,067개소로 전체 3,613개 하수처리시설을 대상으로 분류하였다(MOE, 2013b). 500 m³/day 이상 공공하수처리시설에 대해 시설용량에 따라 중규모(500~50,000 m³/day)와 대규모(50,000 m³/day) 이상으로 분류하고 연계처리 여부에 따라 각각 단독처리와 연계처리로 구분 후, 다시 합류식과 분류식 및 연계처리대상 폐수의 성상을 고려하여 세분화하였다. 세분화된 공공하수처리시설은 적용된 처리공법별 특이성을 고려하여 혐기·무산소·호기공법(A₂O), 연속회분식반응조공법(SBR), 생물막공법(MBR), 담체공법(Media) 등 주요 공법별로 분류하여 조사대상을 선정하였다. 상기에 열거한 대상 처리시설의 특성뿐만 아니라 방류수역의 특성을 고려하여 I, II, III, IV 지역 등 공공수역의 특성까지 조사대상 선정 시 고려하였다. 최종 조사대상은 500 m³/day 이상의 공공하수처리시설은 66개소를 선정하고 500 m³/day 미만 공공하수처리시설에 대해 44개소로 조사대상 시설을 선정하여 2014년 4월부터 2015년 3월까지 2년간 계절별로 6회에 걸쳐 공공하수처리시설 방류수 수질을 조사하였다.

하수처리 시 유입 및 방류수 TOC 기준 설정에 필요한 자료는 6차에 걸쳐 측정된 자료를 활용하였다. TOC 기준설정 방법을 검토하기 위해 기존 방류수 수질기준 항목 중 유기물질 지표항목의 과거 측정된 수질농도와 비교 분석하고자 BOD, COD_{Mn}을 함께 측정하였으며 방류수 내 유기물질 총량을 나타낼 수 있는 TOC와 비교를 위해서 COD_{Cr}도 함께 분석하였다. 조사된 하수처리시설 관련 처리특성 등의 기초자료는 현장조사 자료와 함께 하수도 통계 등 환경부 및 과학원 통계자료를 활용하였다.

2.2 방류수 TOC 수질기준 설정 방법

조사된 측정자료 분석을 토대로 검토한 기준설정 방법으로 우선 가장 간단한 통계근거 설정방법과 전



세계적으로 방류수 기준 설정에 이용되고 있는 기술 근거 설정방법, 수질근거 설정방법 등에 대한 검토와 함께 각 단계별 결과를 종합, 비교하는 단계적 방법론의 적용을 고려하였다.

본 연구에서 적용하는 기준설정 방법론(안)은 1단계로 제한된 data 수, 대표성 제한 등의 현행 data 수준 확인과 기존 제도(BOD, COD_{Mn})와의 연계성을 고려한 통계기반 검토이며, 2단계로는 정상상태의 최적 운전 시 적용될 수 있는 방류수 TOC 농도 범위를 고려한 규모, 처리공정, 정상상태 등 기술기반 검토, 3단계는 지역별 목표수질, 공공수역과의 희석 및 혼합 등을 반영한 수질기반 검토이다. 그러나 수질기반의 경우에는 배출되는 방류수가 공공수역 내 수질에 미치는 영향을 정확하게 평가해야 하나 현재 수준에서는 실제 공공수역으로 유입되는 하수, 산업계 배출수, 비점오염원 등 오염원별 TOC에 대한 정량이 불가능하고 각 오염원별 거동을 명확하게 파악할 수가 없기 때문에 하수 방류수로 배출되는 TOC의 기여도나 영향을 정확하게 산정하기 어려워 직접적인 수질기반 설정방법의 검토 대신에 방류수 기준의 배출 지역별 구분과 연계하여 검토하였다.

TOC 기준설정에 대한 상세한 절차는 Fig. 1과 같으며 데이터에 대한 오류 및 검증은 수행하여 신뢰도가 확보된 자료를 기반으로 통계분석을 위한 기본 데이터 자료를 구축하였다. 이 자료를 기반으로 1차적으로 통계적 기반의 기준설정을 위한 작업을 수행하였다. 즉, 기준설정을 위한 데이터는 전술한 기초통계, 이상치, 오류 등을 검증하고 현행 BOD 및 COD 기준 초과 데이터를 제외하고 분석하였다.

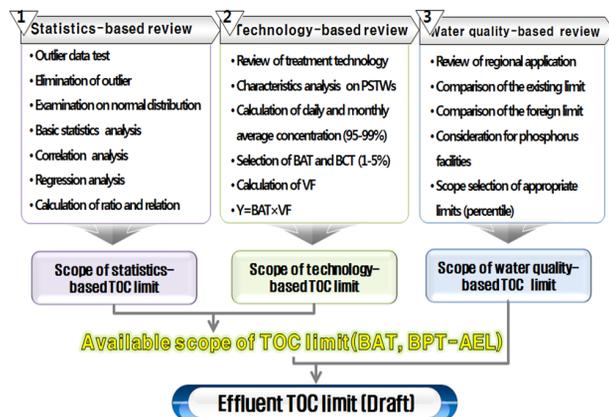


Fig. 1. Specific flowchart to determinate effluent limitation.

기존 데이터와의 연계성을 고려한 기준설정을 위해서 가장 쉬운 방법은 유기물 항목간 회귀분석(R²)과 상관분석을 통해 각 항목별로 통계적 유의성을 가지는지를 확인하고 상관성이 높은 경우에는 항목간 비율을 이용하여 쉽게 통계적 기준값을 산정할 수가 있다. 즉, 상관성이 있거나 높은 경우에는 항목간 비율 및 상관방정식을 이용하여 기존 기준과 대체사용 가능하며 이를 기준설정 방법론 중 통계기반 기준(안)의 수립에 활용할 수가 있다. 실제로 기준설정에서 있어서 비율이나 상관방정식을 이용하는 경우가 매우 드물기 때문에 본 연구에서는 이를 명확하게 하기 위해서 “통계기반 기준”이라는 용어를 사용하였다. 통계적 유의성이 확보가 안 될 경우에는 전통적으로 사용되어 오던 기술근거방법 및 수질근거방법을 중심으로 분석이 이루어져야하며 이때 처리기술, 방류농도 특성, 지역 등 유형별 그룹으로 분석하여 각 특성별 사항을 반영하여 산정되도록 한다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 외국의 하수처리시설 TOC 방류수 수질기준 도입 사례

3.1.1 미국

미국의 수질관련 환경기준은 크게 연방정부 차원의 수질 준거치(Water Quality Criteria, WQC)와 주정부 차원의 수질기준(Water Quality Standard, WQS)으로 분류된다. 따라서 수질기준과 수질오염의 규제는 각 주의 환경여건과 특성을 반영하여 고유한 기준을 제정하고 있으나 수질 준거치 항목은 수질오염물질 중 유해물질(126개의 priority pollutants)을 중심으로 구성되어 있기 때문에 TOC 항목에 대한 규정은 찾아보기 어렵다. 특히, 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 분류체계로 총 56개 산업업종 및 업종별 503개 세 분류에 대한 기준을 마련하고 있다. 이 중 몇 개의 업종에 대해서는 COD 대신에 TOC를 대체 사용할 수 있는 조항을 가지고 있다. 즉, 미국의 폐수배출산업 분류체계 구분 중 염소이온이 1,000 mg/L 이상인 경우에는 COD 대신에

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 263-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

Table 1. Secondary treatment limitations for PSTWs

Parameters	30-day average	7-day average	Removal efficiency
BOD ₅	30 mg/L (or 25 mg/L CBOD ₅)	45 mg/L (or 40 mg/L CBOD ₅)	Not less than 85%
TSS	30 mg/L	40 mg/L	

※ The regulations at § 133.104(b) allow a permit writer to set limitations for COD or TOC instead of BOD₅ if a long-term BOD₅:COD or BOD₅:TOC correlation has been demonstrated.

※ Source : US EPA, 2010.

Table 2. Measurement recommendation for BOD, COD and TOC

Parameters	Concentration	Minimum percentage of reduction ^a	TOC-transferred concentration	Reference method of measurement
BOD ₅ ^b	25 mg/L O ₂	70-90	-	Homogenized, unfiltered, undecanted sample. Determination of dissolved oxygen 10 before and after five day incubation at 20°C ± 1°C, incomplete darkness. Addition of a nitrification inhibitor.
COD _{Cr}	125 mg/L O ₂	75	31.3 mg/L	Homogenized, unfiltered, undecanted sample Potassium dichromate

a) Reduction in relation to the load of the influent.

b) The parameter can be replaced by another parameter: total organic carbon (TOC) or total oxygen demand (TOD) if a relationship can be established between BOD₅, and the substitute parameter.

※ Analyses concerning discharges from lagooning shall be carried out on filtered samples; however, the concentration of total suspended solids in unfiltered water samples shall not exceed 150 mg/L.

※ Source : EU, 1991 and 1998.

TOC로 대체 가능하며, BOD₅에 대해서는 상관관계가 성립되는 경우 TOC/BOD₅ 비율을 2.2로 한다는 예외 조항이 포함되어 있어 TOC 사용을 가능하게 하고 있다. Table 1은 미국의 2차 처리 방류수 기준(40 CFR 133.102)을 나타낸 것이다.

3.1.2 EU 및 독일

유기물질 관련한 EU의 규정은 먹는물 취수를 위한 지표수 원수 지침(75/440/EEC), 먹는물 지침(80/778/EEC), 도시 하·폐수 처리지침(91/271/EEC) 등이 있으며, TOC에 대한 항목을 사용할 수 있도록 되어 있으나 기준값은 제시되고 있지 않다. 이는 도시 하·폐수 처리지침의 경우 다음과 같은 기준 값(Limit value)을 제시하고 있으며, TOC의 경우 BOD 항목과 상관관계가 성립되는 경우에 한하여 BOD를 대체하여 사용 가능하도록 규정하고 있다(Table 2).

독일의 물 관리 및 규제와 관련한 연방법으로는 가장 상위법인 연방물관리법(Federal water act, WHC)이 있으며 지표수보호법(Ordinance on surface waters,

OGewV), 폐수법(Wastewater Ordinance) 등을 규정하고 있다. 이중 폐수법에서는 수체 내로 폐수 배출 및 방류를 허가할 때 적용하도록 57개 업종에 대해서 배출 규모에 따라 규제기준(기본항목 COD_{Cr}, BOD₅, NH₄-N, TN, TP)을 제시하고 있다. TOC와 관련된 사항으로는 본 법령 제6조(Compliance with the requirements)에서는 폐수배출허가에 지정된 COD_{Cr} 값은 mg-C/L 단위로 표시된 총유기탄소(TOC) 값의 4 배를 초과되지 않았을 때 기준을 달성한 것으로 간주된다고 규정하고 있다. 예를 들어, 하수의 경우 EU 하수도지침(COD 125 mg-O₂/L)에 따라 어떤 처리시설이 TOC 환산농도로 31.3 mg-C/L 이하인 경우에는 기준을 초과하지 않는다고 해석할 수가 있다. Table 3에 이러한 규정에 대한 구체적 예로서 독일 폐수법에서 규정하고 있는 생활하수처리시설에서 COD_{Cr} 기준값을 근거로 TOC 기준을 나타냈다. 독일 및 유럽은 규모를 BOD 원단위로 구분하고 있어, 국내의 규모와 비교하기 위해 BOD 200 mg/L를 기준으로 설계한 경우를 가정한 것이다.



Table 3. Requirements for wastewater at the point of discharge

Classification	Samples according to size categories of the wastewater treatment plants		BOD ₅ (mg.L)	COD _{Cr} (mg/L)	TOC-transferred concentration
	Less than 60 kg/day BOD ₅ (raw)	Less than 300 m ³ /day			
Domestic and Communal Wastewater	60~300	300~1,500	25	110	27.5
	300~600	1,500~3,000	20	90	22.5
	600~6,000	3,000~30,000	20	90	22.5
	Greater than 6,000	Greater than 30,000	15	75	18.8

※ It is to calculate daily BOD loads in assuming the concentration of BOD as 200 mg/L in influent water.

※ Source : Germany, 2004.

3.2 방류수 수질기준 설정 방법

기준설정 방법론은 비율 및 관계식 등 통계적 근거를 이용한 설정방법, BAT(Best available technology) 및 BPT(Best practicable technology) 적용에 따른 방류수 농도자료 등 기술근거를 이용한 설정방법, 독성 및 공공수역에 미치는 영향 등 수질근거를 이용한 설정방법이 있으나 본 연구에서는 통계를 근거로 한 방법과 기술에 근거한 방법 그리고 지역내 설정된 기준(수질근거) 및 달성률을 근거한 방법(경험적 방법)을 검토하였다(Fig. 2). 앞서 언급한 것처럼 수질근거 설정방법의 경우 최종적이고 설정된 기준의 타당성을 확인할 수가 있으나 유역내 모든 오염원에 대한 배출경로와 영향을 모두 파악하지 않고 단순히 처리시설 내에서 나오는 TOC만을 고려할 수 있는 제한적인 상황에서는 정확한 산정이 불가능하고 공공수역에 유입되는 모든 오염원에 대한 분석이 이루어져야 하는데 본 연구에서는 이 부분에 대한 연구가 불가하여 향후, TOC 오염원들에 대한 조사들이 모두 완료가 되고 TOC

관련 기준과 원단위 자료가 많이 축적되면 유역 내 정확한 TOC 기여율과 영향을 평가하여 수질근거 기준설정의 타당성을 살펴볼 필요가 있다.

3.2.1 통계적 기반 검토

1) 기본통계량 및 분포

방류수 기준은 결국 방류수 농도에 대한 자료를 근거로 만들어지기 때문에 전체 측정자료 중에서 BOD, COD_{Mn} 기준을 초과하는 모든 자료를 제외한 기준설정을 위한 방류수 data 자료를 만들었다. 특히, 본 연구는 TOC 방류수 기준을 마련하는 것이기 때문에 TOC 농도에 영향을 미치지 않거나 TN, TP 등 상관성이 없는 항목에 대해서는 제외하고 TOC, COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD 만을 고려하였다. BOD의 경우 현행 기준값인 5 mg/L, 10 mg/L 이하인 자료만을 대상으로 하였으며 COD_{Mn}은 20 mg/L, 40 mg/L 이하의 농도를 기준산정을 위한 data로 확정하고 이때 나타날 수 있는 TOC와 COD_{Cr}에 대한 값을 기준 설정에 필요한 자료로 사용하였다. 현행 기준에 따라 정상적으로 운전되는 시설의 경우에도 일부 비정상적으로 높거나 낮은 TOC 또는 COD_{Cr}의 일정 범위의 값을 가질 것이라는 가정을 적용하였다. 즉, 조사결과 일부 높은 농도가 나타나는데 이 중에서 상당 부분은 같이 조사된 모든 항목이 동일하게 높아지기 때문에 이상치 보다는 유입성상 및 운전상의 특성이라 판단되어 포함시켰으나 기준설정 범위에서는 추가적인 확인을 통해 부적합한 경우 제외하였다. 이는 측정된 값들이 방류수 수질기준보다 낮게 측정되는 경우가 대부분인데 수질기준을 초과하는 경우에 대비하여 운전시설을 가동하기 때문이다. 만약 이런 상황을 고려하지 않고 측정된 결과만을 고려하여 기준을 설정하게 되면 향후 하수처리시설에서 처리 효율을 높게 유지해야 하므로 기준을 맞추기 위해 시설

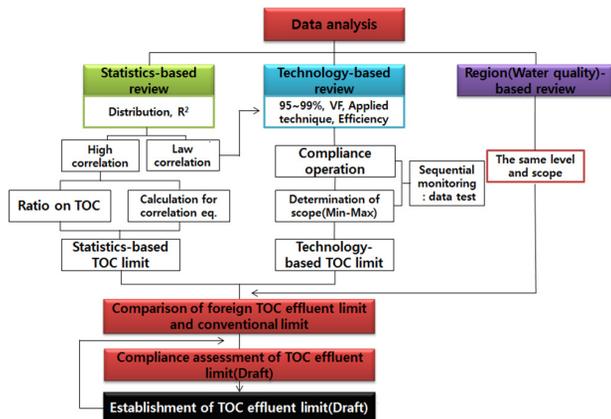


Fig. 2. Framework for determination method of TOC effluent limitation.

- pp. 225-231
- pp. 233-240
- pp. 241-251
- pp. 253-261
- pp. 263-270
- pp. 271-278
- pp. 279-284
- pp. 285-291
- pp. 293-297
- pp. 299-312
- pp. 313-319
- pp. 321-325
- pp. 327-334
- pp. 335-341
- pp. 343-350

Table 4. Basic statistics of water quality data to determine TOC effluent limitation

Classification		TOC	DOC	BOD	COD _{Mn}	COD _{Cr}
Sample numbers	Available values	522	520	525	526	531
	Unknown values	180	182	177	176	171
Average		6.6	5.3	2.9	7.3	17.9
50 %ile		5.6	4.8	2.0	6.6	14.0
Standard deviation		6.4	3.2	2.3	4.1	19.7
Minimum		0.9	0.8	0.1	0.2	1.0
Maximum		121.9	49.7	10.0	35.2	388.8
Percentile concentration (mg/L)	5 %ile	2.4	2.0	0.6	2.8	4.0
	10 %ile	3.3	2.7	1.0	3.6	6.0
	50 %ile	5.6	4.8	2.0	6.6	14.0
	75 %ile	7.4	6.3	4.0	8.4	21.6
	85 %ile	8.7	7.3	5.3	9.7	25.9
	90 %ile	9.5	7.8	6.5	11.2	30.0
	95 %ile	12.9	9.9	7.9	15.6	36.0
	99 %ile	26.4	15.1	9.6	25.6	67.7

Table 5. Calculation for the ratio of organic matters and TOC parameter

Classification		Sample numbers (Available)	Average (mg/L)				Ratio related to TOC		
			TOC	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD
Total		522	6.6	17.9	7.3	2.9	2.8	1.2	0.5
Facility capacity (m ³ /day)	Greater than 500	311	6.4	16.9	7.5	2.5	2.8	1.3	0.5
	50~500	111	7.3	21.6	7.0	3.7	3.2	1.2	0.7
	Less than 50	100	6.4	17.1	7.0	3.2	2.7	1.2	0.6
	Less than 500	211	6.9	19.5	7.0	3.4	3.0	1.2	0.7
Region	I area grade	55	4.6	12.3	5.3	1.9	2.8	1.2	0.4
	II area grade	87	6.1	15.0	7.1	1.8	2.6	1.2	0.3
	III area grade	125	6.4	17.0	7.3	3.3	2.8	1.3	0.6
	IV area grade	44	9.3	25.9	11.8	2.6	2.9	1.4	0.3
Treatment technology	A ₂ O	201	7.0	18.9	7.5	2.7	2.8	1.2	0.5
	MBR	71	5.6	17.1	6.5	2.8	3.1	1.2	0.6
	Media	67	7.5	21.2	8.8	2.8	3.0	1.3	0.5
	SBR	104	6.7	17.0	7.0	3.3	2.7	1.1	0.6
	Others	28	6.4	15.9	7.2	3.0	2.6	1.2	0.5
	Contacted oxidation	51	5.1	13.7	6.6	3.0	3.1	1.5	0.7

개량 등 추가적인 조치가 필요하다. 이러한 경우 하수처리시설에 대해 커다란 경제적 부담을 야기할 수 있다.

분석 자료에 대한 기본통계량을 나타내면 Table 4와 같다. 방류수의 TOC 평균은 6.6 mg/L이며 최소값은 0.9, 최대값은 121.9 mg/L로 조사되었다. COD_G의 경우에는 평균 17.8 mg/L이고 최소값은 1.0, 최대값은 388.8 mg/L로 나타났다. 99번째 백분위수가 TOC 26.4 mg/L, COD_G는 67.7 mg/L로 나타나 최상위 1 percentile의 측정값은 이상치일 가능성(최

대값의 경우 121.9 mg/L로 99 percentile 값의 4.6배에 해당)이 높다는 것을 확인할 수가 있어 기준설정에서 최대값은 99 percentile 수준으로 설정할 필요가 있다.

2) 특성별 평균값 및 TOC와의 비율

조사된 자료에 대한 전체, 규모, 지역, 적용공정에 대한 평균값 및 비율을 나타내면 Table 5와 같다. TOC 유효개수 522개를 기준으로 했을 때 규모구분의 TOC



농도범위는 6.4~7.3 mg/L로 50~500 m³/day의 농도가 가장 높았다. 지역의 평균 TOC 농도범위는 4.6~9.3 mg/L로 IV의 농도가 가장 높았다. 공정의 경우에는 5.1~7.5 mg/L이었으며 접촉산화 방식의 농도가 가장 낮고 Media 공정의 방류수 농도가 가장 높았다. TOC와의 비율은 큰 차이가 보이지 않았으며 COD_{Cr}/TOC 비는 2.6~3.2, COD_{Mn}/TOC 비는 1.1~1.5, BOD/TOC 비는 0.3~0.7 수준으로 BOD > COD_{Mn} > COD_{Cr} 순서로 비율 변동 폭이 큰 것으로 나타났다.

3) 특성별 회귀분석 및 상관분석 결과

세부 특성별 통계적 유효성 및 상관성을 검증하기 위해 선형회귀분석 및 상관분석을 수행하여 결정계수(R²) 및 Spearman ρ값을 구해본 결과는 다음 Table 6과 같다. 상관성이 있는(통상적으로 ≥ 0.7) 이상의 값을 가지는 항목을 살펴보면 회귀분석의 경우에는 COD_{Cr}과 상관분석에는 COD_{Cr}, COD_{Mn}에서 일부 있는 것으로 나타났으나 통계적 상관성이 매우 낮아 실제 적용 시에 많은 오차가 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 독일 등에서 COD_{Cr} : TOC와의 비율(4배)을 이용하는 방법 및 관계식을 적용하기에는 상관성이 상당히 낮아 본 연구에서 고려했던 “통계적 TOC 범위”를 단순 적용하여 TOC 값을 산정하는 것은 보다 신중한 판단이 필요하다. 통계적 상관성이 낮지만 항목간 비교로 판단해 보면 BOD 보다는 COD의 비율을 적용하는 것이 더 바람직한

것으로 판단되며 COD_{Cr}이 더 통계적으로 유의성이 높으나 국내에 COD_{Cr} 관련 공식적인 자료의 부족으로 비교할 수 있는 방법이 없어서 본 연구에서는 현행 기준항목인 COD_{Mn}을 검토 기준으로 비교하여 분석하였다.

4) 통계기반 근거 TOC값 산정

기본 통계, 데이터 분포, 상관성 분석을 통해 하수 TOC 결과는 기준항목과의 상관성이 낮아 통계기반 근거로 산출된 TOC값이 실제 기준으로 적용될 때 과대 또는 과소 기준으로 적용될 가능성이 높아 일부 맞지 않는 부분이 있을 것으로 판단되지만 기준값(COD_{Mn})과의 비율을 토대로 TOC 값을 산정해 보면 Table 7과 같이 계산될 수가 있다. 계산 값을 살펴보면 규모나 지역에 대한 비율이 거의 일정하게 나타났으며 독일의 TOC 허가기준이 처리시설 규모별로 18.8~37.5 mg/L를 가지는 것과 비교하면 대략적인 범위는 유사한 것으로 판단된다. 그러나 독일 등 EU 경우 하수 유입수의 농도가 국내의 하수처리시설 보다 1.5~2배 정도 수준으로 높아 방류수 농도도 상대적으로 높아 비교 시 유의하여 고려해야 한다. 따라서, 단순 비율적용은 특수 상황에 대한 오류를 유발할 수가 있기 때문에 다양한 자료 축적과 비교가 필요하다. 본 연구에서 조사한 결과에서 COD_{Mn}/TOC 비는 1.2~1.4배 정도의 범위로 나타났다.

3.2.2 기술적 기반 검토

현재 상황에서는 하수처리공정에서 BAT, BPT 등 세부

Table 6. Regression and correlation analysis for organic matters and TOC parameter

Classification (TOC)	Sample number (Available)	R ² ≥0.7			Spearman ρ≥0.7		
		COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD	COD _{Cr}	COD _{Mn}	BOD
Total	522	0.79	0.22	0.03	0.62	0.66	0.17
Facility capacity	Greater than 500	0.27	0.20	0.01	0.58	0.69	0.14
	50~500	0.95	0.43	0.04	0.61	0.71	0.26
	Less than 50	0.57	0.24	0.11	0.76	0.58	0.18
	Less than 500	0.91	0.31	0.04	0.69	0.64	0.22
Region	I area grade	0.09	0.23	0.00	0.27	0.63	0.07
	II area grade	0.05	0.06	0.00	0.48	0.53	0.02
	III area grade	0.26	0.23	0.02	0.58	0.65	0.22
	IV area grade	0.20	0.04	0.02	0.49	0.43	-0.05
Treatment technology	A ₂ O	0.89	0.29	0.04	0.59	0.63	0.12
	MBR	0.62	0.29	0.02	0.75	0.71	0.09
	Media	0.55	0.29	0.00	0.69	0.69	0.10
	SBR	0.28	0.34	0.08	0.60	0.70	0.33
	Others	0.34	0.60	0.08	0.63	0.81	0.33
	Contacted oxidation	0.52	0.16	0.06	0.38	0.45	0.06

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 263-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

Table 7. Calculation for TOC effluent limitation using the ratio of COD_{Mn} and TOC

Classification		COD _{Mn} (mg/L)	COD _{Mn} /TOC			TOC (mg/L)
			Facility capacity	Region	Average	Concentration calculation
Greater than 500 m ³ /day PSTWs	I area grade	Less than 20	1.3	1.2	1.25	16.0
	II area grade	Less than 20	1.3	1.2	1.25	16.0
	III area grade	Less than 40	1.3	1.3	1.30	30.8
	IV area grade	Less than 40	1.3	1.4	1.35	29.6
50 m ³ /day~500 m ³ /day PSTWs		Less than 40	1.2	1.2	1.20	33.3
Less than 50 m ³ /day PSTWs		Less than 40	1.2	1.2	1.20	33.3

Table 8. Calculation for technology-based TOC effluent limitation

Classification		TOC (mg/L)				
		95 %ile	Average	50 %ile	Variability factor (No unit)	TOC calculation
Total		12.9	6.6	5.6	1.95	10.8
Facility capacity	Greater than 500	12.2	6.4	5.7	1.91	10.9
	50~500	16.3	7.3	5.4	2.23	12.0
	Less than 50	13.4	6.4	5.4	2.08	11.2
	Less than 500	13.9	6.9	5.4	2.01	10.9
Region	I area grade	8.2	4.6	4.4	1.77	7.8
	II area grade	9.4	6.1	5.6	1.53	8.6
	III area grade	11.8	6.4	5.8	1.85	10.7
	IV area grade	19.9	9.3	8.5	2.15	18.2
Treatment technology	A ₂ O	11.5	7.1	5.7	1.63	9.3
	MBR	12.7	5.6	5.1	2.26	11.5
	Media	16.0	7.5	6.2	2.15	13.3
	SBR	14.0	6.7	6.0	2.10	12.5
	Others	12.1	6.4	6.5	1.89	12.3
	Contacted oxidation	12.9	5.1	4.3	2.51	10.8

적인 기술 정의와 적용이 쉽지 않고 앞절에서 각 공정별 비교결과 규모가 큰 경우에는 공정에 따른 편차가 크지만 접촉산화법이나 Media 공법을 적용한 처리기술의 경우 방류수 농도가 상대적으로 낮아 규모가 작은 하수처리시설에서 방류수 TOC 농도 차가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 현재 적용되는 공정의 경우, BOD 제거를 목적으로 적용되고 있기 때문에 기준치보다 낮게 운전되고 있는 현 수준에서는 국내 하수처리시설에 적용되는 공정을 모두 BPT 또는 BAT로 볼 수가 있을 것으로 판단된다. 따라서 최적 기술수준은 50 percentile 수준을 가지는 값을 가장 적정한 값으로 판단하였다.

미국의 NPDES 기술근거 설정방법의 경우 일평균 값 및 월평균 값을 사용하고 있으며 이때 일평균 값은 99 percentile 값을 월평균 값은 95 percentile 값을

사용하고 있다(US EPA, 2010). 처리기술에 근거한 TOC 농도의 상한값은 일부 고농도의 값들이 발생될 가능성이 있는 것으로 판단되고 기준설정에 가장 중요한 지역별 분석에서는 99 percentile 값이 존재하지 않아서 전체적으로는 95 percentile 값을 적용하였다. 다만 국내의 경우에는 피크 값에 의한 관리가 되기 때문에 99 percentile(일평균 값)에 대한 값도 함께 고려하였다. 변동계수(Variability factor, VF)는 실제 처리시설의 변동여부를 반영하여야 하지만 일부 하수처리시설에 대한 연속측정결과 유입수의 변동이 있어도 실제적으로 방류수의 변동이 적은 것으로 나타나 기술근거 방정식을 사용하여 값을 구하였다(Table 8). 규모와 지역, 공정특성에 따라 TOC 값은 다양하게 제시될 수 있는데, 현재 조사된 자료의 경우 실질적으로



기준치보다 20~30% 수준 더 낮은 농도로 방류를 하도록 운전된 결과물이기 때문에 이 값보다는 더 높게 기준값이 설정될 필요가 있다.

3.2.3 경험적 근거 검토

통계적 기반이나, 기술적 기반을 검토하였으나 항목간의 상관성이 크지 않고 기술적 근거 적용시 너무 강화된 기준이 설정될 가능성이 있기 때문에 기존의 유기물질 기준을 준수할 경우에 가질 수 있는 TOC 값을 산정해 보았다. 이는 통상적으로 기준을 설정할 때 적정수준을 75 percentile 이상에서 90 percentile 수준으로 설정하는 것에 근거하여 검토하지만 국내의 경우에는 피크관리에 따른 결과로 BOD는 최저 70 percentile, COD_{Mn}의 경우

에는 99 percentile 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 이런 특성을 고려하여 70 percentile은 너무 낮은 값이기 때문에 적정 수준을 75~99 percentile로 하여 각 범위 내에 나타나는 TOC 값을 정리하면 다음과 같다. 다만 99 percentile 값이 없는 경우에는 96~98 percentile 농도를 제시하였다(Table 9).

3.2.4 TOC 적정 기준(안) 산정범위 설정

통계 및 기술, 경험식을 근거한 기준(안)을 나타내면 Table 10과 같다. 통계에 근거한 기준안의 경우 상대적으로 높은 값으로 산정되고(최고 가능한 값) 기술에 근거한 기준안은 낮은 값(하위 가능한 범위)으로 산정이 되며 경험적 적용 범위(95~99 percentile)를 통

Table 9. Calculation for experience-based TOC effluent limitation

Classification		BOD	COD _{Mn}	TOC (mg/L)				
		5 mg/L	20 mg/L	75 %ile	80 %ile	90 %ile	95 %ile	96~99 %ile
Total		83 %ile	98 %ile	7.4	7.9	9.5	12.9	26.4
Facility capacity	Greater than 500	90 %ile	98 %ile	7.4	8.0	9.2	12.2	22.8
	50~500	70 %ile	96 %ile	7.4	7.9	9.5	16.3	22.9
	Less than 50	75 %ile	97 %ile	7.3	8.2	11.1	13.4	26.8
	Less than 500	70 %ile	97 %ile	7.4	7.9	9.7	13.9	25.8
Region	I area grade	-	-	5.2	5.6	6.8	8.2	9.5
	II area grade	-	-	7.0	7.4	8.4	9.4	17.0
	III area grade	80 %ile	99 %ile	7.4	7.7	9.3	11.8	27.0
	IV area grade	85 %ile	92 %ile	11.4	12.2	13.2	19.9	24.8
Treatment technology	A ₂ O	87 %ile	98 %ile	7.5	8.0	9.1	11.5	22.8
	MBR	85 %ile	97 %ile	6.6	6.8	9.1	12.7	13.4
	Media	82 %ile	95 %ile	8.7	9.0	13.1	16.0	26.3
	SBR	75 %ile	98 %ile	7.5	7.9	10.3	14.0	26.5
	Others	75 %ile	-	7.7	8.2	9.4	12.1	12.7
	Contacted oxidation	75 %ile	96 %ile	5.6	5.9	7.7	12.9	25.5

Table 10. Reviewed calculation scope for TOC effluent limitation

Classification		Reviewed TOC effluent limits (mg/L)				
		Statistic ratio-based limits	Technology-based limits	Experience-based limit		Interim limit scope
				95 %ile	99 %ile	
Greater than 500 m ³ /day PSTWs	I area grade	16.0	7.8	8.2	9.5	7.8~16.0
	II area grade	16.0	8.6	9.4	17.0	8.6~17.0
	III area grade	30.8	10.7	11.8	27.0	10.7~30.8
	IV area grade	29.6	18.2	19.9	24.8	18.2~29.6
50 m ³ /day~500 m ³ /day PSTWs		33.3	12.0	16.3	22.9	12.0~33.3
Less than 50 m ³ /day PSTWs		33.3	11.2	13.4	26.8	11.2~33.3

pp. 225-231
pp. 233-240
pp. 241-251
pp. 253-261
pp. 263-270
pp. 271-278
pp. 279-284
pp. 285-291
pp. 293-297
pp. 299-312
pp. 313-319
pp. 321-325
pp. 327-334
pp. 335-341
pp. 343-350

해 최저 가능한 수준의 기준 범위가 설정된다. 이 범위 중에서 기존 방류수 관리 정책과의 연계성을 고려하여 방류수 TOC 수준을 결정하는 범위가 결정된다. 이런 논리를 통해 결정된 잠정 TOC 기준안 범위 내에서 기준값을 결정할 필요가 있다.

3.3 방류수 수질기준(안) 범위 설정에 대한 고찰

적정한 수준의 기준값을 결정하기 위해서 가장 좋은 방법은 적용할 때 얼마나 현실적으로 적용 가능한가에 대한 평가이다. 즉, 과도한 기준설정에 따른 현실적 준수불가는 기준의 본 기능을 상실하게 된다. 이런 문제점을 해결할 수 있는 방법 중의 하나가 달성률이다. 이는 기준이 적용되었을 때 현행 시설 중에서 어느 정도가 개선이 필요하고 향후 어느 정도 수준까지 유도를 할 것인가를 결정할 수 있는 자료로 보통 현행 BOD, COD_{Mn} 준수 수준부터 단계별 강화 정도에 따라 설정, 확인이 된다. 이런 추세로 살펴보면 BOD는 90% 이상, COD_{Mn}은 80% 이상 수준이나 TOC 도입은 처음이고 기반이 마련되지 않은 상황이기 때문에 설정에 따른 기존시설의 부담을 낮추고 현행 BOD, COD_{Mn}을 준수하면서 TOC 기준도 맞출 수 있

는 수준으로 설정하기 위해서는 93% (15 mg/L)~97% (25 mg/L) 수준에서 결정하는 것이 바람직하다고 판단되었다(Table 11). 또한, 현행 기준체계를 유지하지 하기 위해서 500 m³/day 이상 I, II지역과 500 m³/day 이상 III, IV지역 및 500 m³/day 미만 지역의 기준값이 동일한 값을 갖도록 하는 것이 바람직하다.

이런 목표에 따라 지금까지 조사된 자료에 대한 달성률을 평가할 수 있다. 조사대상 시설수가 하수처리 시설 전체라면 시설별로 달성률을 산정하는 것이 좋으나 국내의 초과 판정은 피크 농도 또는 임의 시점의 수질 농도가 기준을 넘으면 초과하는 것으로 보기 때문에 채수 시료당 각각에 대한 초과평가를 수행하였다. 즉 Table 12와 같이 잠정 방류수 수질기준으로 제시된 TOC 값에 대해서 각 측정된 방류수 TOC 값과의 비교를 통해서 그 달성률을 평가하였다. 즉 조사지역의 경우 II지역이어서 BOD 5 mg/L, COD 20 mg/L 이하가 적용된다. 2개의 조사 대상 처리시설에 대한 평가시 각 측정별로 TOC 농도의 초과여부로 달성률을 평가하였으나 2번씩은 매우 낮은 기준값을 나타냈지만 1번씩의 높은 값으로 인하여 현행 초과 판정방법에 따라 기준을 초과한 처리시설이 될 수가 있으나 처리시설별 평

Table 11. Assessment result of compliance ratio for interim TOC effluent limitation

Classification		Sample numbers	TOC limits (mg/L)							
			7.0	8.0	9.0	10.0	15.0	20	25	30
		Compliance numbers/Compliance ratio(%)								
Greater than 500 m ³ /day PSTWs	I area grade	55	50/90.9	52/94.5	54/98.2	55/100	-	-	-	-
	II area grade	87	67/77.0	75/86.2	81/93.1	84/96.6	85/97.7	86/98.9	87/100	-
	III area grade	125	88/70.4	104/83.2	112/89.6	116/92.8	122/97.6	123/98.4	123/98.4	124/99.2
	IV area grade	44	-	-	30/68.2	33/75.0	41/93.2	42/95.5	43/97.7	43/97.7
50 m ³ /day~500 m ³ /day PSTWs		111	81/73.0	91/82.0	97/87.4	101/91.0	105/94.6	107/96.4	108/97.3	108/97.3
Less than 50 m ³ /day PSTWs		100	68/68.0	79/79.0	86/86.0	90/90.0	97/97.0	98/98.0	98/98.0	100/100

Table 12. Compliance assessment for interim TOC effluent limitation

POTWs	Area grade	Influent water(mg/L)			Effluent water(mg/L)			TOC limit (15 mg/L)	Average (mg/L)
		TOC	BOD	COD _{Mn}	TOC	BOD	COD _{Mn}		
1	II	70.3	76.2	38.4	15.1	2.7	10.9	No compliance	10.5
		46.6	22.5	27.1	9.0	9.0	20.0	Compliance	
		30.5	215.7	52.2	7.4	1.0	9.5	Compliance	
2		77.1	47.1	28.6	3.7	1.2	7.0	Compliance	10.6
		34.8	149.4	52.7	5.0	1.1	5.9	Compliance	
		82.5	212.4	79.2	23.0	1.3	5.0	No compliance	



균 TOC 농도를 살펴보면 10.5 mg/L, 10.6 mg/L로 기준 검토 값인 TOC 15 mg/L이하로 나타나 평균값 적용 시에는 기준을 초과하지 않는 것으로 볼 수가 있다. 따라서, 평균개념의 초과판정에 대한 적용여부 검토가 TOC 기준 적용 시에는 검토될 필요성이 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

2013년 공공수역에서 난분해성 유기물질 관리를 위해 ‘수질 및 수생태계 환경기준’의 유기물질 지표항목으로 TOC 항목을 설정하였다. 공공수역에서 주요 오염물질 배출원인 공공하수처리시설의 방류수에서 기인하는 난분해성 유기물질을 포함한 총유기물질 관리를 위해 국내 현장 여건에 적합한 방류수 TOC 수질 기준 설정방법을 마련하는 것이 시급하다.

본 연구에서는 하수처리시설의 방류수 TOC 수질기준을 마련하기 위해 EU 하·폐수처리 지침, 미국 배출수 가이드라인, 독일 폐수법 등을 조사하였는데 이들 나라에서는 TOC 항목은 규제 항목이라기보다는 관리 또는 평가 항목으로 주로 적용되고 있다. 국내 여건을 고려하여 하수처리시설에서 처리에 대한 불완전성과 TOC라는 새로운 항목의 도입에 대한 경험과 자료가 부족하고 실제 규제를 받는 하수처리시설에서 도입 초기에 부담으로 작용하지 않는 수준으로 현행 방류수 수질기준 적용 체계와 동일하게 TOC 기준을 설정하고자 하였다. 이를 위해서 통계에 근거한 설정방법 그리고 기준 설정의 보편적 방법인 기술에 근거한 설정방법, 수질에 근거한 설정방법 등에 대한 검토와 함께 각 단계별 결과를 종합하는 단계적 방법론을 적용하여 TOC 방류수 수질기준 설정방법을 제안하였다.

References

- EU (1991). Water quality in the European Union, Council Directive of 21 May 1991 concerning Urban wastewater treatment(91/271/EEC); EU (1998). Revised Directive. Federal Environmental Agency (2001). Environmental policy, water resources management in Germany.
- Germany (2004). Ordinance on Requirements for the Discharge of Waste Water into Waters (Waste Water Ordinance - AbwV).
- 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) (2012). Supplementary measures of environmental criteria for water qualities and water ecosystem(Healthy protection and TOC).
- Ministry of Environment (2013a). Implementation act of basic law for environmental policy.
- Ministry of Environment (2013b). Statistics of sewerage.
- National Institute of Environmental Research(NIER) (2011). A study on characteristics and structure of natural organic matter in sewage effluents.
- Panyapinyopol, B., Marhaba, T.F., Kanokkantung, 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).
- US EPA (2010). NPDES permit writers's manual.
- 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.

EU (1991). Water quality in the European Union, Council Directive of 21 May 1991 concerning Urban wastewater

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 265-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 283-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350