



하수처리시설에서 총유기탄소(TOC) 처리를 위한 운영·관리 고찰

A study on operation and management for TOC removal of public sewage treatment works

정동환·정현미·조양석·김은석·김창수·박준원·이원석*

Dong-Hwan Jeong·Hyenmi Chung·Yangseok Cho·Eunseok Kim·Changsoo Kim·Junwon Park·Wonseok Lee*

국립환경과학원 상하수도연구과, 인천 서구 환경로 42, 22689

National Institute of Environmental Research, Water Supply and Sewerage Research Division, Incheon Seo-gu
Hwangyeong-ro 42, 22689

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

ABSTRACT

Total organic carbon (TOC) will replace chemical oxygen demand (COD_{Mn}) as an effluent water quality standard in public sewage treatment works (PSTWs) from 2021 in Korea. To ensure effective control of TOC in the effluent, investigation was carried out into TOC levels and sewage treatment operation factors in five target PSTWs using anaerobic-anoxic-aerobic (A₂O) processes, media, membrane, and sequencing batch reactor (SBR) technologies. TOC removal efficiencies appeared to be 93-96% on average. As a fraction of TOC, biodegradable dissolved organic carbon (BDOC) was reduced from 64% in the influent to 9% in the effluent in these PSTWs. During the investigation, biological treatment processes were applied flexibly for operation factors such as HRT, SRT, MLSS, F/M ratios and BOD volume loads, based on the influent characteristics and design conditions. As a result, we suggest efficient operating conditions in PSTWs by evaluating relationships between TOC removal and operation factors.

Key words: Total organic carbon (TOC), Public sewage treatment works (PSTWs), Operation factor, Biodegradable dissolved organic carbon (BDOC)

주제어: 총유기탄소, 공공하수처리시설, 운영인자, 생물분해 가능한 용존유기탄소

1. 서 론

하천 및 호소에서 환경기초시설의 확충에 따라 BOD가 개선되었으나 난분해성 유기물질(COD_{Mn})은 지속적으로 증가하여 개선효과가 미흡한 것으로 나타났다. COD_{Mn}은 유기물질에 대한 산화력이 30~60% 정도로 부족하여 총유기탄소(TOC)를 난분해성 유기물질 등 전체 유기물질에 대한 새로운 관리지표로 설정

할 필요성이 대두되었다. 이를 해결하기 위해 2013년 수질 및 수생태계 환경기준에 TOC 항목을 도입하였고, 환경부에서는 방류수역에서 TOC 항목에 대한 중권역 환경기준 달성을 위해 하수처리시설 방류수 TOC 기준설정을 위한 조사연구 사업(NIER, 2015a)을 수행하여 2015년 방류수 수질기준에 TOC 항목 도입 방안을 마련하였다. TOC 기준 도입 계획에 따르면 신규 및 증설 하수처리시설은 2019년부터 TOC 기준(안)을 우선 적용하고 기존 하수처리시설은 2021년부터 적용할 예정이다(MOE, 2018).

이와 관련하여 먼저 수질 및 수생태계 TOC 환경기

Received 17 September 2018, revised 16 November 2018, accepted 21 November 2018.

*Corresponding author: Wonseok Lee (E-mail: boystone@korea.kr)

준 설정을 위한 경제적 영향 분석, 기준의 적정성 및 달성률 평가 등을 검토하여 우리 실정에 적합한 TOC 환경기준(안)을 마련하였다(NIER, 2011). 국내 하수, 산업폐수, 가축분뇨, 분뇨 등 처리시설에서 TOC 규제 제도 설정 근거, 기준 설정에 필요한 자료 확보를 위해 장기 수행계획을 수립하여 중장기적 추진과제를 제시하였다(NIER, 2012). 또한 환경부는 공공수역 유기물질 관리지표 전환에 따라 수질오염총량관리제에서도 대상물질을 BOD에서 TOC로 전환 추진 중에 있으며 수질오염총량관리제의 TOC 배출부하량 및 할당부하량 산정에 활용하기 위해 생활계 오염원에 대한 TOC 원단위를 조사하여 제시하였다(NIER, 2014). 공공수역 내 설정된 TOC 목표기준 달성을 위한 산업계로부터 배출되는 TOC의 규제기준 마련을 위하여 폐수배출시설로부터 발생하는 폐수의 TOC·유기물질의 배출 및 처리실태 파악과 함께 폐수 관리를 위한 TOC 배출허용기준 및 TOC 배출 원단위 산정에 필요한 기초자료를 확보하였다(NIER, 2015b).

하수처리시설을 대상으로 TOC를 조사한 연구를 살펴보면, 국내 하수처리시설에서 하수 배제방식, 지역 구분, 연계처리 등 세부적으로 구분하여 TOC 배출특성을 조사하였고, 처리공법에 따른 제거효율을 평가하여 A₂O공법 80.0%, MBR공법 83.2%, Media공법 78.6%, SBR공법 72.8%로 보고하였다(Jeong et al., 2014). 또한 국내 4개 하수처리시설의 생물학적 처리공법에 따른 TOC, COD_{Cr}, COD_{Mn}, BOD₅의 제거효율을 각각 93.7%, 91.4%, 91.7%, 86.9%로 나타내었으며, TOC와 다른 유기물질 지표와의 상관관계 분석을 통해 TOC가 COD_{Mn}을 대체하여 수질 지표로서의 활용이 가능하다고 하였다(Cho et al., 2014). 해외 사례로 표준활성슬러지공법을 이용하는 그리스의 도시 하수처리시설에서 유기물질 관리를 위한 DOC 제거효율을 조사하여 원수에서 DOC 71~72 mg/L, 2차침전지의 유출수에서 19 mg/L로 나타나 생물학적 공정에 의해 처리되는 것을 확인하였다(Katsoyiannis and Samara, 2007). 미국의 뉴욕, 플로리다 등 하수처리시설 방류수에서 MBR공법, 표준활성슬러지공법, SBR공법, RBC공법 등 4가지 생물학적 처리공정의 TOC를 측정하였는데 TOC 중 BDOC가 차지하는 비율은 RBC공법 32%, 활성슬러지공법 24%, SBR공법 19%, MBR공법 15%로 조사되었다(Weinrich, 2010).

이와 같이 하수처리시설에서 공법별 TOC 제거효율 평가, TOC와 기존 유기물질과의 상관관계 분석 등 선행 연구가 수행되어 왔으나 하수처리시설 방류수 수질기준에 TOC 항목을 유기물질 관리지표로 규정하고 있는 나라가 없어 비교·분석할 수 있는 연구 사례가 부족하다. 또한 우리나라 하수도 시설기준에서도 BOD·COD 등의 유기물질과 관련된 운영인자에 대한 설계 값 및 운영조건이 상세하게 설명되어 있으나 TOC와 관련된 운영인자에 대한 설명은 부족하다. 그리고, 하수처리시설에서 TOC 내 생물학적 처리가능한 유기물질의 양과 TOC가 생물학적 처리공정을 거치면서 얼마나 처리되는지 BDOC를 측정함으로써 정량적으로 평가할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 TOC 항목을 방류수 수질기준의 관리지표로 도입하는 경우를 대비하여 하수처리시설에서 효율적인 TOC 관리를 위해 하수처리 공정·공법별 TOC 처리효율 평가, TOC와 다른 수질항목과의 상관관계 분석을 포함한 BDOC 거동 변화 등을 조사하였다. 또한 하수처리시설 처리공정에서 SRT, HRT, MLSS, BOD 용적부하, F/M 비, C/N 비, DO 등 다양한 운영인자 및 처리조건을 조사하였고, 이들 결과를 종합하여 하수처리시설 공정별 TOC 거동 및 공정상태를 분석하고 하수처리시설에 대한 운영관리 방안을 제시하였다.

2. 연구방법

2.1 조사대상 하수처리시설

500 m³/일 이상 공공하수처리시설 중에서 A₂O공법 2개소, SBR공법 1개소, Media공법 1개소, MBR공법 1개소를 조사대상 하수처리시설로 선정하였으며, 시설 현황을 Table 1에 나타내었다. 또한 5개소 하수처리시설에 대한 운영관리 자료를 조사·분석하여 BOD 용적부하, F/M 비, MLSS 농도, HRT 등의 설계기준과 실제 운영인자를 비교하여 나타내었다(Fig. 1).

2.2 시료채취 및 분석방법

2016년 4월부터 2017년 11월까지 총 24회에 걸쳐 대상 하수처리시설에서 공법 및 공정별 TOC에 대한 시계열 모니터링을 실시하였으며, 하수처리시설 5개소의 처리 공정 및 채수 지점은 Table 2에 나타내었다.



Table 1. Characteristics of each public sewerage treatment work (PSTW)

PSTWs	Region	Treatment capacity in 2017 (m ³ /day)	Treatment technology	Categorized series	Remarks
WN	III	70,860	CSBR	SBR	-
SH	III	16,010	DeNiPho	Media	-
SE	IV	41,250	4-stage BNR	A ₂ O	Underground
JJ	III	10,270	4-stage BNR	A ₂ O	Underground
JB	III	2,810	MBR	MBR	Underground

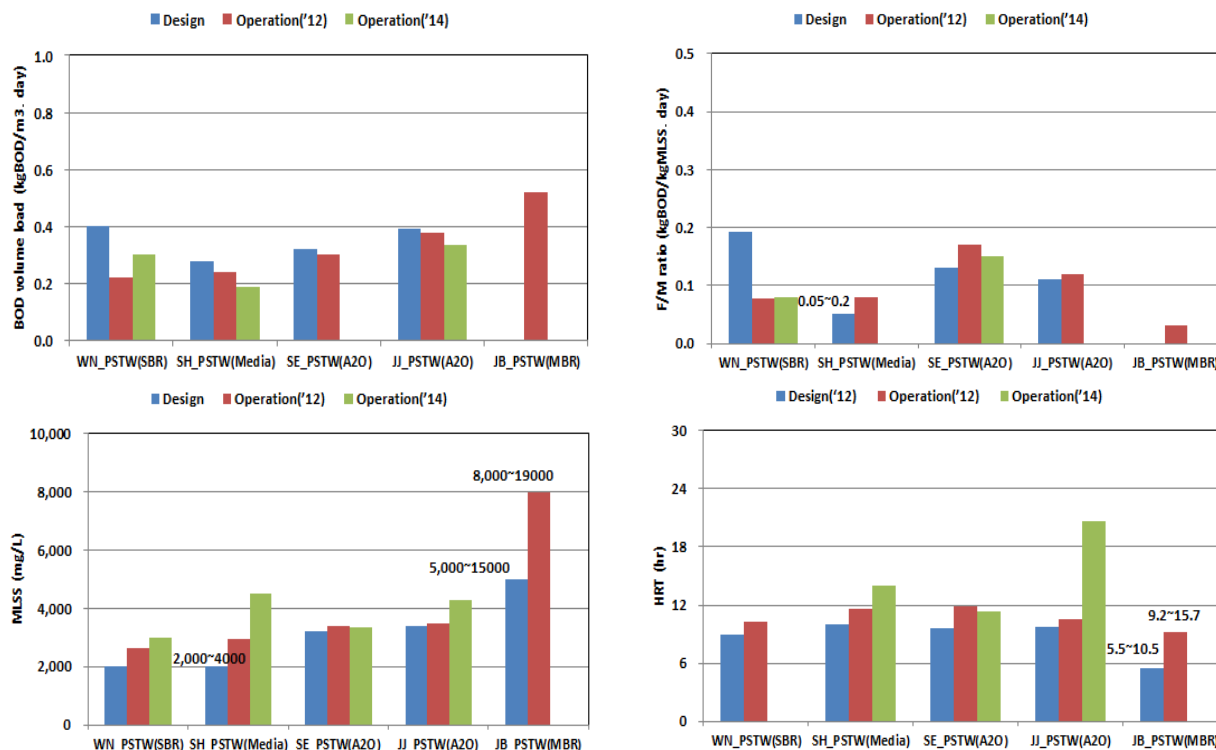


Fig. 1. Status of operation factors in target PSTWs in 2012 and 2014. (The range shown with number indicate the minimum and maximum of operation factors in five public sewerage treatment works. A bar graph below the number indicates the minimum value.)

Table 2. Sampling sites in target PSTWs

PSTWs	Sampling sites (*)
WN(SBR)	Influent* → Grit chamber outflow(Distribution tank)* → (Reaction tank) → Outflow* → (Phosphorus treatment facility) → (Disinfection facility) → Effluent*
SH(Media)	Influent* → 1st settling tank outflow* → (Reaction tank) → 2nd settling tank outflow* → (Phosphorus treatment facility) → (Disinfection facility) → Effluent*
SE(A ₂ O)	Influent* → 1st settling tank outflow* → (Reaction tank) → 2nd settling tank outflow* → (Phosphorus treatment facility) → (Disinfection facility) → Effluent*
JJ(A ₂ O)	Influent* → Flow control tank outflow* → (Reaction tank) → Settling tank outflow* → (Phosphorus treatment facility) → (Disinfection facility) → Effluent*
JB(MBR)	Influent* → Flow control tank outflow(Distribution tank)* → (Reaction tank) → Outflow* → (Phosphorus treatment facility) → (Disinfection facility) → Effluent*

pp. 479-485
pp. 487-497
pp. 499-505
pp. 507-515
pp. 517-526
pp. 527-533
pp. 535-550
pp. 551-557
pp. 559-572
pp. 573-581

조사항목은 T(D)OC, BDOC, SS, BOD, COD_(Cr,Mn), TN (NH₃-N), TP (PO₄-P), pH, DO, 수온, EC, ORP이다. Table 3에 나타낸 것과 같이 대부분 수질오염공정시험기준에 제시된 분석방법으로 측정 분석하였으나 (MOE, 2015), 수질오염공정시험기준이 없는 BDOC 등은 국내·외 연구사례를 검토하여 분석하였다 (Cha et al., 2003; McDowella et al., 2006; Servais et al., 1987, 1989; Son et al., 2004, 2006). BDOC의 거동 분석은 하수처리시설 공정별 4지점에서 2017년 11월 (가을), 2018년 1월 (겨울), 5월 (봄), 8월 (여름)에 시료를 채수하여 측정·분석하였다. 우선 채수한 하수 시료는 0.45 µm 필터로 여과하고 50 mL 실린더에 과학원 내 연못에서 채수한 물의 상등액 1 mL를 취해 4개 시료를 20°C에 맞추어 4주간 인큐베이터에 배양한다. 처음 채수일(0일)부터 DOC를 구하고 이 값이 초기 BDOC가 되며, 배양한 시료를 통해 7일 DOC를 구하고 이 값을 초기 BDOC에서 빼주면 7일 BDOC가 된다. 이런 과정을 반복하면서 14일, 21일, 28일 BDOC를 구한다. 마지막 측정한 28일 BDOC를 최종 BDOC로 한다 (Cha et al., 2003; Son et al., 2006). 여기서 DOC 측정은 수질오염공정시험기준에 따라 고온연소

산화방법으로 분석하였다. 채수한 하수 시료를 0.45 µm 필터로 여과하고 HCl을 첨가하여 pH를 2 이하로 낮춘 다음 비정화성 유기탄소 (Non-purgeable organic carbon, NPOC) 측정방법으로 정량하였다. 이때 사용한 측정분석 기기는 TOC analyzer Multi N/C[®] 3000 (Analytik Jena, Germany)이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 하수처리시설 TOC 처리효율

대상 하수처리시설에 대한 처리구역의 하수 발생특성에 따라 TOC 유입수질은 30.5~403.6 mg/L 범위에서 차이가 나타났다. 또한 생물학적 처리 후 방류수 TOC 농도는 2.7~7.9 mg/L로 매우 양호한 처리수준을 유지하는 것으로 조사되었다. 대상 하수처리시설의 TOC 처리효율은 92.6~96.0%로 높게 나타났으며, TN 처리효율은 70.0~85.7%로 다른 항목에 비해 다소 낮게 나타났다 (Fig. 2). 그 외 BOD는 98.3~99.7%, COD_{Mn}은 91.0~95.8%, COD_{Cr}은 94.4~97.3%, TP는 94.4~96.6%가 처리되는 것으로 조사되었다.

Table 3. Analytic substances and methods in this study (MOE, 2015)

Substances		Analytic contents	Standard methods
BOD	Biochemical oxygen demand	5 days biochemical oxygen demand	ES 04305.1b
COD	COD _{Mn} (Chemical oxygen demand)	Titrimetric method-permanganate	ES 04315.1a
	COD _{Cr} (Chemical oxygen demand)	Titrimetric method-dichromate	ES 04315.3b
TOC	Total organic carbon	High temperature combustion method	ES 04311.1c
DOC	Dissolved organic carbon	0.45 µm filtration and high temperature combustion method	ES 04311.1c
BDOC	Biodegradable DOC	"	-
SS	Suspended solids	Filtration through glass fiber filters, drying at 105~110°C	ES 04303.1b
TN	Total nitrogen	Ultraviolet spectrometry-oxidation method	ES 04363.1b
NH ₃ -N	Ammonium nitrogen	Ultraviolet spectrometry	ES 04355.1b
TP	Total phosphorus	Ultraviolet spectrometry	ES 04362.1c
PO ₄ -P	Phosphate phosphorus	Ultraviolet spectrometry-ascorbic acid method	ES 04360.2c
pH	Potential of hydrogen	Electrode method	ES 04306.1b
Temperature	-	Temperature thermistor	ES 04307.1a
DO	Dissolved oxygen	Electrode method	ES 04308.2b
Conductivity	-	Electrode method	ES 04310.1b
ORP	Oxidation-reduction potential	Electrode method	-

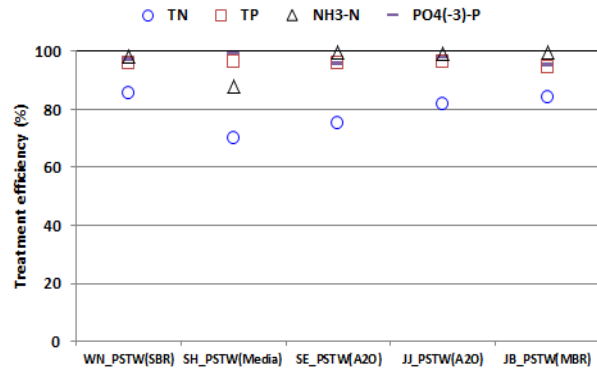
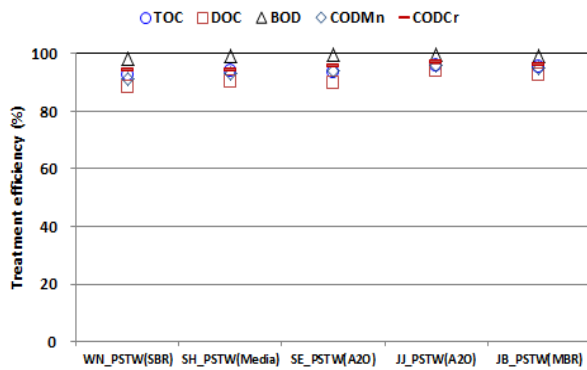


Fig. 2. Status of treatment efficiency in target PSTWs.

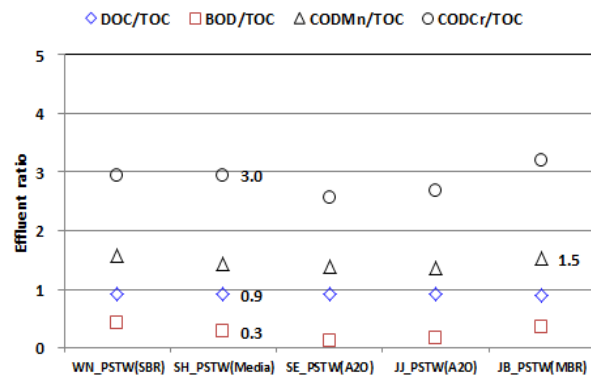
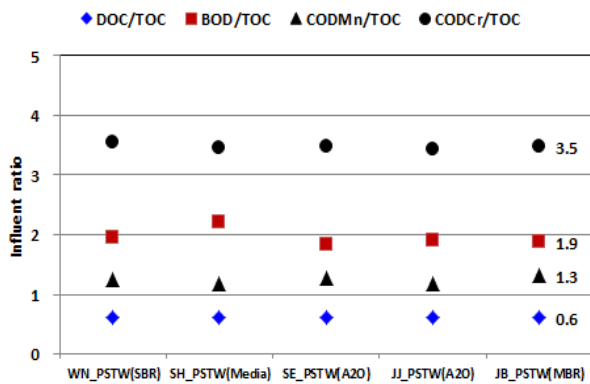


Fig. 3. Ratio of organic substances for TOC in target PSTWs. (Numbers indicate average value of the ratio of organic substances for TOC in five public sewage treatment works).

대상 하수처리시설의 DOC/TOC 비율은 유입수 61%에서 방류수 91%로 증가하여 처리공정을 거치면서 생물학적으로 분해가능한 유기물질은 미생물에 의해 흡수되는 것으로 판단되었다. 이들 시설의 BOD/TOC 비율은 유입수 2.0 (1.8~2.2)에서 0.27 (0.1~0.4)로 크게 낮아져 대부분은 유기물질은 산화(제거)되는 것으로 나타났다. 또한 COD_{Mn}/TOC 비율은 유입수 1.2 (1.2~1.3)에서 방류수 1.5 (1.4~1.6)로 약간 증가 하였으나, COD_{Cr}/TOC 비율은 유입수 3.5 (3.4~3.6)에서 방류수 2.9 (2.6~3.2)로 낮아지는 것으로 나타났다 (Fig. 3). 해외 하수처리시설에서도 스웨덴 Henriksdals 하수처리시설 유입수-방류수의 COD_{Cr}/TOC 비율이 각각 3.8, 3.4로 차이가 없는 반면 본 연구사업의 대상 하수처리시설에서는 차이가 있는 것으로 나타났다 (NIER, 2012). 이는 Henriksdals 하수처리시설은 표준활성슬러지 공법을 사용하는 반면 본 연구에서 조사대상 하수처리시설은 모두 고도처리공법을 채택하고 있어 난분해성 유기물질 제거 기작이 조금 더 효율적으로 작동

하고 있는 것으로 판단되었다.

대상 하수처리시설의 처리용량이 2,810~70,860 m³/일 으로 전체적으로 중소규모 시설에 해당되고 민간 위탁하여 효율적인 운영관리가 이루어지고 있어 본 연구의 조사결과 III~IV지역 TOC 기준(안) (I~II지역 15 mg/L 이하, III~IV지역 25 mg/L 이하)을 만족하는 것으로 나타났다. 처리공법에 따라 대상 하수처리시설에 대한 MBR 공법 (JB PSTW)의 방류수 TOC 농도 (3.7 mg/L)가 가장 낮게 나타났고, SBR공법 (WN PSTW)의 방류수 TOC 농도 (5.3 mg/L)가 높게 나타났다. 또한 Media공법 (SH PSTW) 및 A₂O공법 (SE 및 JJ PSTW)의 방류수 TOC 농도 (4.1~4.6 mg/L)는 유사하게 나타났다 (Fig. 4).

3.2 하수처리시설 공정별 TOC 거동 및 공정상태 분석

3.2.1 하수처리시설 유입수 및 방류수의 TOC 등 수질 상관분석

조사대상 하수처리시설의 유입수 수질 데이터에 대

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

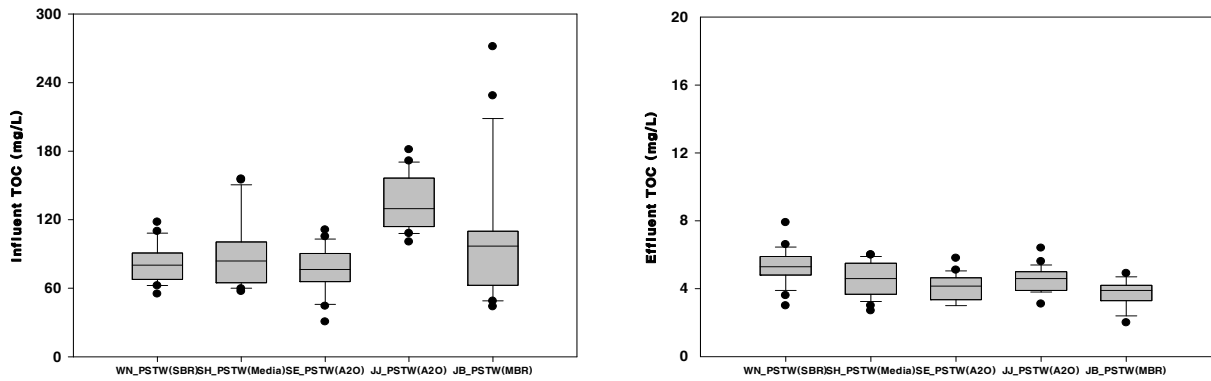


Fig. 4. TOC concentration of influent and effluent in target PSTWs. (Boxes indicate variability of quartiles and the spaces of the box show the degree of data dispersion. The line in the box indicates median value of quartiles and outliers are plotted as individual dots, maybe meaning variability distant from a range of total measurement. Vertical lines from the boxes indicate variability outside the upper and lower quartiles.).

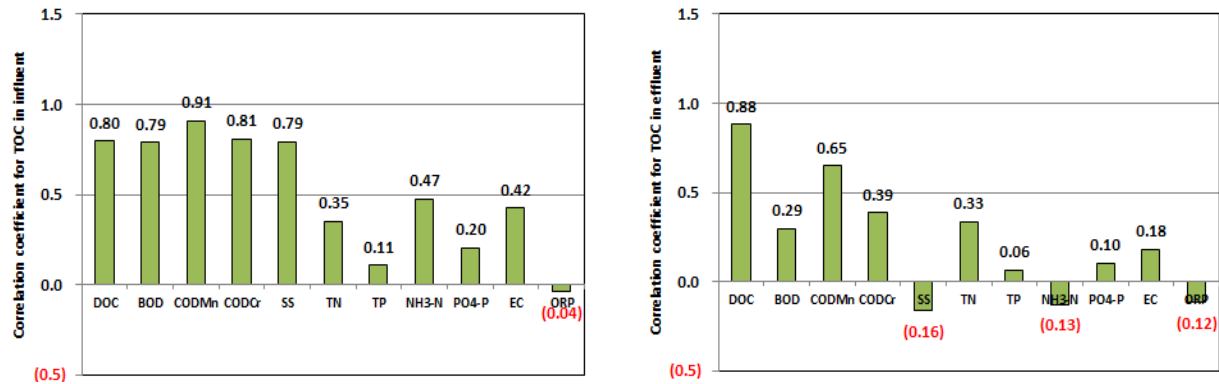


Fig. 5. Correlation analysis for TOC and other water qualities. (ORP is inverse-correlated in the correlation coefficient of TOC and water quality substances in influent, also SS, NH₃-N, and ORP are too inverse-correlated in effluent.).

한 상관분석 결과, 조사한 수질항목 중 DOC 0.80, BOD 0.79, COD_{Mn} 0.91, COD_{Cr} 0.81, SS 0.79로 TOC와의 상관관계가 높게 나타났다(Fig. 5). 또한 조사대상 하수처리시설 방류수 수질 데이터에 대한 상관분석 결과 TOC와 높은 상관관계를 갖는 항목은 DOC 0.88로 고형물질을 제거한 용존상태라도 상관관계가 높게 나타났으나 대부분 수질항목에 상관관계는 낮았다. 이는 하수처리시설 유입수에서 유기물질은 자연상태로 교란되지 않고 존재하는데 비해 방류수에서는 수질기준을 만족하기 위해 생물학적 처리과정, 총인처리시설, 소독과정 등 인위적인 처리과정을 거치면서 대부분의 유기물질이 제거되어 성분구성이 변화되었기 때문인 것으로 판단된다.

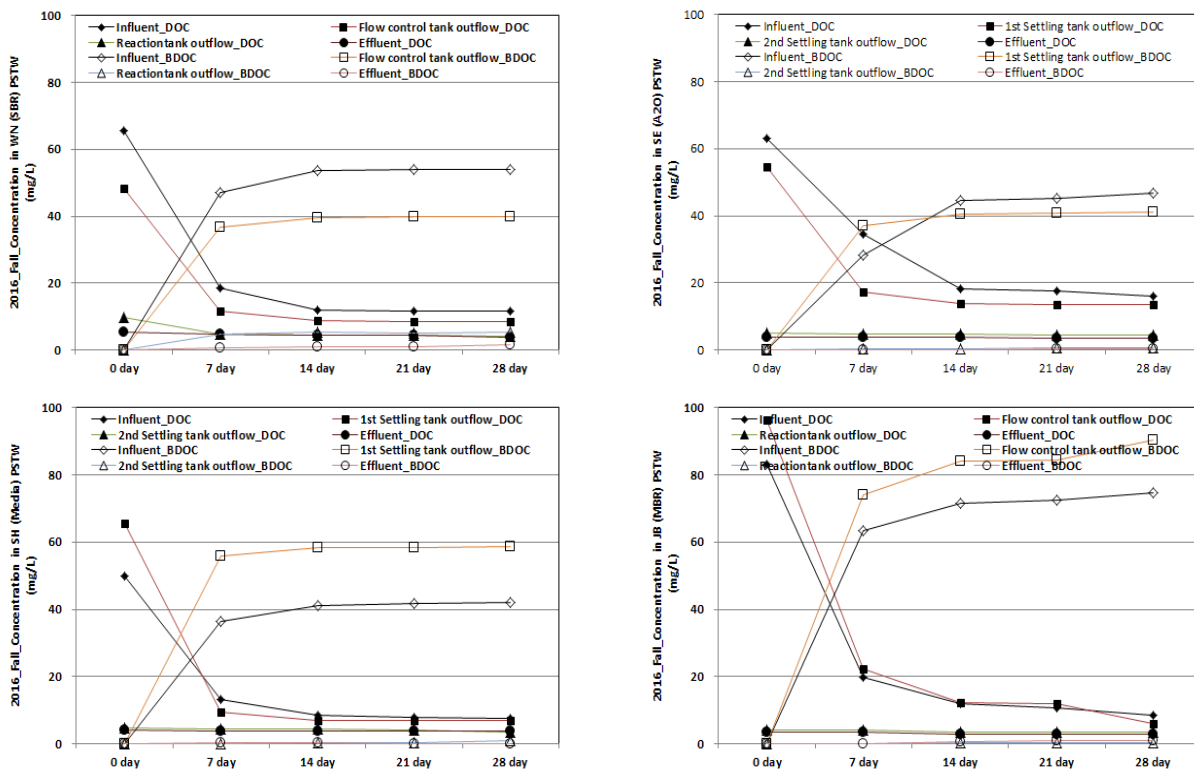
3.2.2 하수처리시설 BDOC에 대한 공정별·계절별 거동 분석

하수처리시설 유입수(원수)에서 BDOC는 42.1~181.5 mg/L, 1차침전지(또는 유량조정조) 유출수에서 BDOC는 27.7~100.3 mg/L로 이들 공정에서 BDOC가 차지하는 비율이 크며, 처음 7일간 BDOC 소모가 큰 것으로 나타났다. 2차침전지 유출수의 DOC 농도 조사결과 유기물질은 생물반응조에서 거의 처리되어 낮은 농도로 나타났고 이는 생물학적 처리공정을 거치면서 BDOC 소모가 큰 것으로 판단되었다(Table 4, Fig. 6). 생물반응조를 거친 2차침전지 유출수의 BDOC는 0~5.4 mg/L이고 최종 방류수에서 BDOC는 0~1.5 mg/L로 거의 없거나 약간 증가한 것으로 조사되어 대부분 유기물질은 생물 분해가능한 물질이고 생물학적 처리공정을 거치면서 대부분 제거되는 것을 나타낸다.



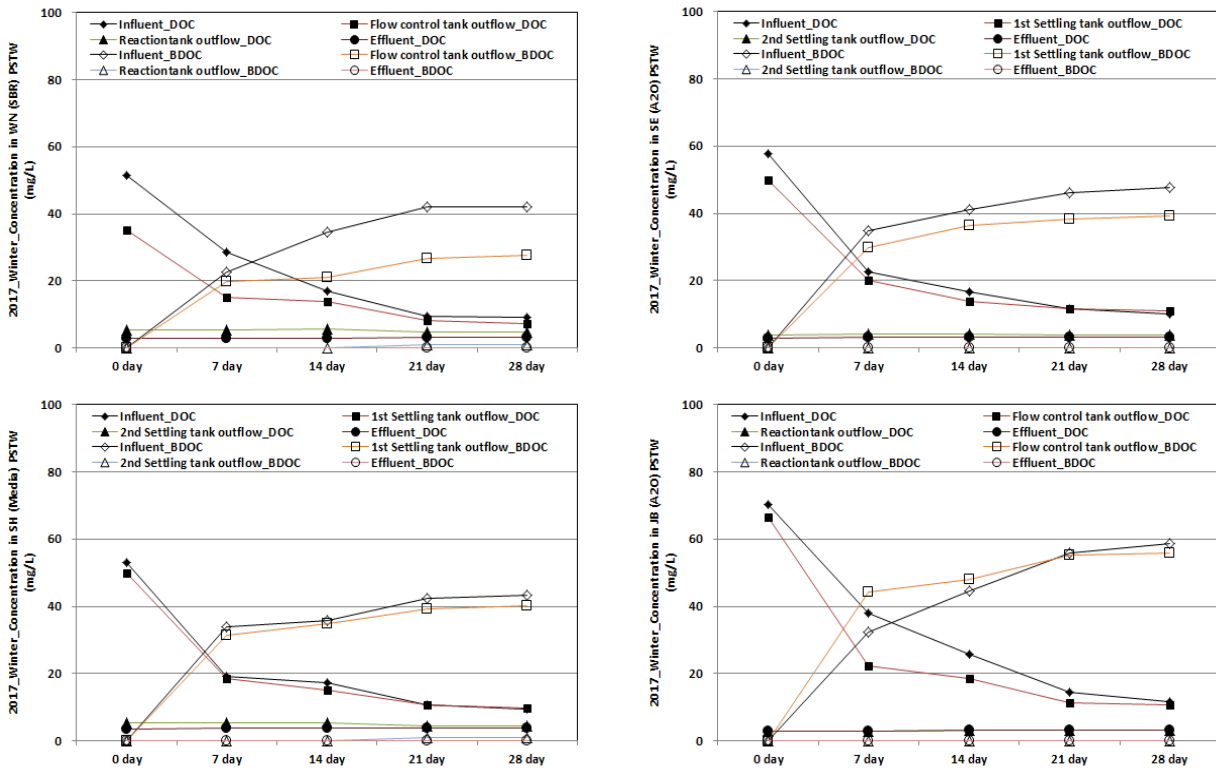
Table 4. Seasonal BDOC concentrations for PSTWs treatment processes (Unit : mg/L)

PSTWs	Classification	Fall	Winter	Spring	Summer
WN PSTW (SBR)	Influent	53.9	42.2	45.2	38.9
	Flow control tank outflow	40.0	27.7	36.1	34.7
	Reaction tank outflow	5.4	0.9	1.6	2.7
	Effluent	1.5	0.0	1.0	0.5
SH PSTW (Media)	Influent	42.1	43.4	53.6	46.2
	1st Settling tank outflow	58.5	40.1	49.2	36.3
	2nd Settling tank outflow	1.0	0.9	0.9	0.8
	Effluent	0.2	0.0	0.1	0.9
SE PSTW (A ₂ O)	Influent	46.9	47.7	51.5	38.3
	1st Settling tank outflow	41.0	39.2	49.8	31.3
	2nd Settling tank outflow	0.7	0.2	1.0	0.9
	Effluent	0.5	0.0	0.4	0.0
JJ PSTW (A ₂ O)	Influent	84.9	81.0	73.1	60.2
	Flow control tank outflow	100.3	67.5	72.1	52.1
	Settling tank outflow	1.2	0.0	0.2	0.5
	Effluent	0.6	0.0	0.2	0.3
JB PSTW (MBR)	Influent	74.8	58.6	181.5	38.7
	Flow control tank outflow	90.4	55.8	65.0	49.6
	Reaction tank outflow	0.4	0.0	0.1	0.2
	Effluent	0.9	0.0	0.0	1.2

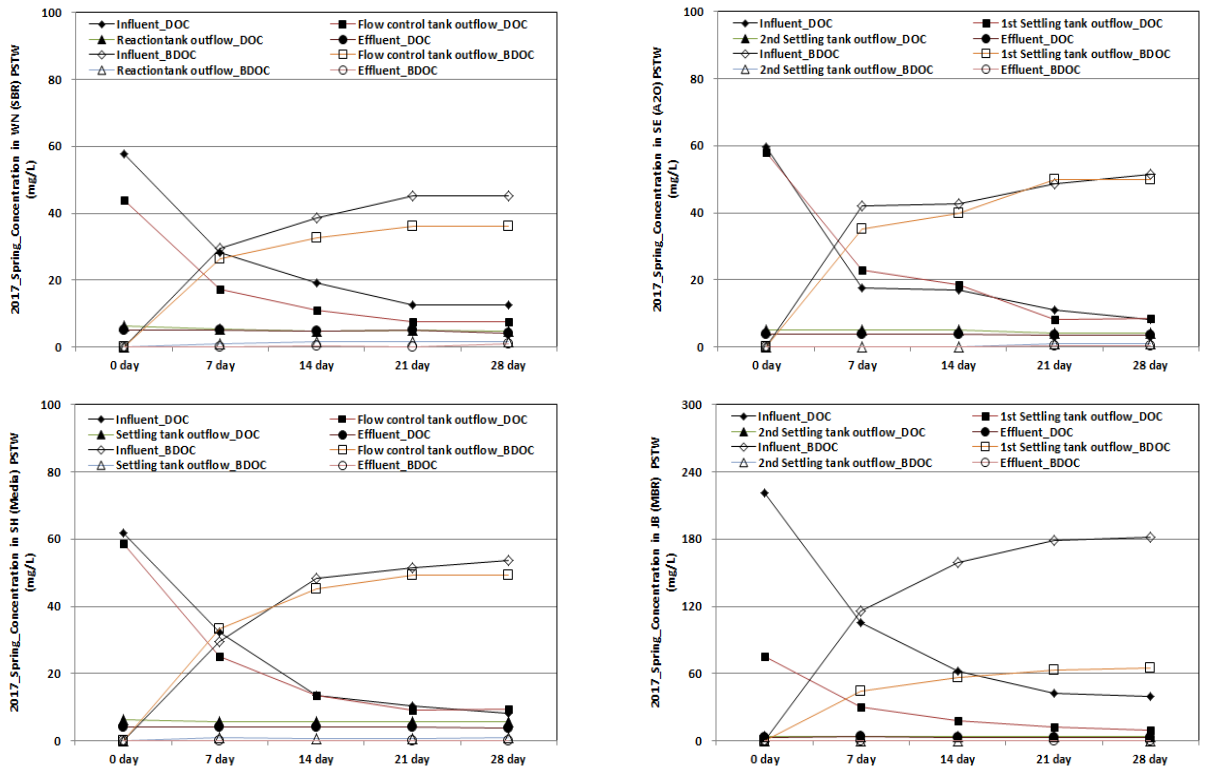


(a) BDOC in Fall (on November, 2016)

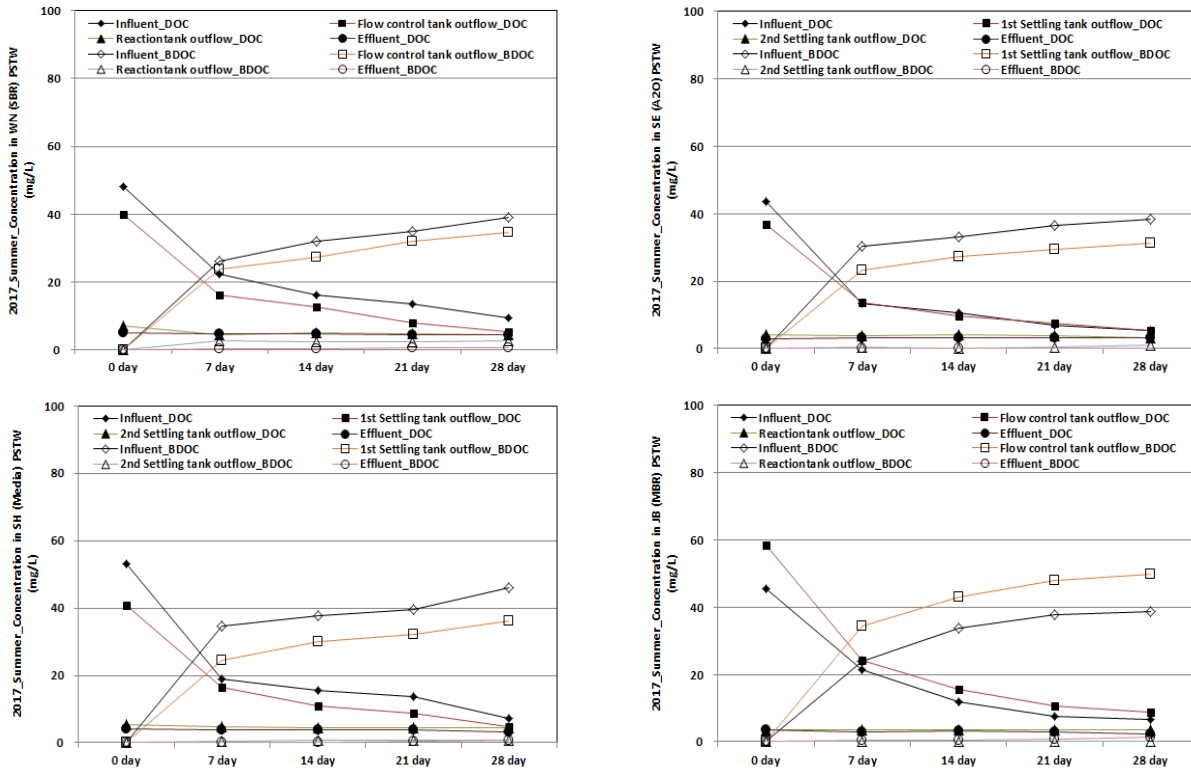
pp. 479-485
pp. 487-497
pp. 499-505
pp. 507-515
pp. 517-526
pp. 527-533
pp. 535-550
pp. 551-557
pp. 559-572
pp. 573-581



(b) BDOC in Winter (on January, 2017)



(c) BDOC in Spring (on May, 2017)



(d) BDOC in Summer (on August, 2017)

Fig. 6. Seasonal variation of BDOC by treatment process in PSTWs. (BDOC is created by subtracting 7 day, 14 day, 21 day, and 28 day DOC from 0 day DOC in graphs. Final BDOC is 28 day BDOC. Seasonal variation of BDOC by treatment process in PSTWs is not appeared well.).

그러나 SH 하수처리시설 (Media)의 유입수 및 1차침전지 유출수에서 봄철 및 겨울철 DOC 소모량의 차이가 없으므로 1차침전지에서 BDOC 소모가 일어나지 않음을 알 수 있다.

하수처리시설 유입수에서 TOC 내 생물 분해가능한 DOC (BDOC)가 차지하는 비율 (BDOC/TOC)은 평균 63.6% (47.6~77.6)로 조사되었고, 방류수에서는 평균 9.3% (0~33.4)로 조사되었다. 처리시설별로 BDOC/TOC 비율살펴보면 유입수에서 이 비율이 SH 하수처리시설 (Media)이 가장 높은 67.0%로 나타났으며, 방류수에서는 6.2%로 나타났다. 이러한 결과 역시 앞에서 설명하였듯이 생물학적 처리공정을 거치면서 유기물질이 잘 제거되는 것을 의미한다. 다만, WN 하수처리시설 (SBR)에서 BDOC/TOC비율을 조사한 결과 유입수에서 64.3%, 분배조 유출수에서 60.1%, 반응조 유출수에서 29.3%, 방류수 14.5%로 나타나 다른 하수처리시설에 비해 상대적으로 BDOC의 비율이 높게 나타났다.

3.2.3 하수처리시설 TOC 운영관리를 위한 공정상태 분석

2차침전지 유출수 TOC 및 BOD 농도와 반응조 운영조건과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 2차침전지 유출수의 BOD 농도와 반응조 운영조건과의 그래프는 TOC 농도와 반응조 운영조건과의 그래프를 비교 검토하기 위해 제시하여 그 변동 범위가 큰 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 7의 그래프에서 보듯이 TOC의 농도와 운영조건과의 관계는 BOD에 비해 변동폭이 크지 않음을 알 수 있다. 이는 TOC를 통한 하수처리시설의 운영관리가 BOD보다 용이하다는 것을 의미한다. 본 고찰은 하수처리시설에서 TOC 관리와 관련된 내용을 다루므로 TOC에 대해 주로 설명하고자 한다.

1) HRT (Hydraulic retention time, hr) 및 SRT (Solids retention time, day)

HRT (수리학적 체류시간)는 반응슬러지를 고려하지 않은 하수의 폭기시간을 가리키며 A₂O공법에서는

보통 5~8 hr이 적용되고 있다. 유입수의 수량 및 수질, 지의 용량 등에 따라 처리수의 수질이 양호해 지는 체류시간을 경험적으로 정한다. 저농도 도시하수 처리의 경우, HRT를 일반적으로 표준시간보다 단축하여도 유기물질 처리효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타날 경우 HRT를 낮게 운전하여 나머지 폭기조 용적을 탈질공정을 위한 처리시설이나 유입용량의 과부하에 대처할 수 있는 시설로 활용할 수도 있다.

JB (MBR) 하수처리시설을 제외하고는 HRT는 10 hr 정도에서 운영조건을 설계하여 5.5~9.8 hr의 범위에서 운전하고 있다. WN (SBR) 및 JJ (A₂O) 하수처리시설은 HRT 설계조건인 9.0 hr 및 9.8 hr 보다 높여 각각 17.2~19.8 hr, 14.6~20.1 hr의 범위에서 2배 정도 길게 운영하였다. 이러한 운영조건에서 TOC 처리효율은 90% 이상 유지하는 것으로 조사되었으며, 2차침전지 유출수의 TOC 농도는 4.6~11.9, 4.5~8.0 mg/L의 범위로 조사되어 양호한 처리결과를 얻었다. HRT는 하수처리시설 공법별 설계한 대로 구분하여 일정한 범위에서 운전되고 있는 것을 확인할 수 있다.

SRT (고형물 체류시간)는 활성슬러지가 하수처리시설 전체 시스템 내에 체류하는 시간을 의미한다. 그러나, 통상적으로 최종침전지 및 반송슬러지의 경로 등에 포함되어 있는 활성슬러지량과 처리수 중의 활성슬러지량을 무시한 폭기조 (반응조)의 활성슬러지만으로 계산되어 활용되고 있다. 최종침전지에서 분리된 고형물의 일부는 폐기되고 일부는 다시 반송되어 슬러지는 HRT보다는 긴 시간 동안을 폭기조 내에서 체류하게 된다.

반면 SRT는 슬러지 인발 및 반송에 따라 시설별 차이가 있으며 SE (A₂O) 하수처리시설의 SRT는 18.5~43.2 day로 같은 A₂O공법을 적용하고 있는 JJ 하수처리시설의 SRT

4.2~14.4 day보다 길게 운전이 이루어지고 있다. 이는 SE (A₂O) 하수처리시설의 슬러지 처리시설에서 슬러지 건조, 시설 수리, 동절기, 유입하수의 BOD 농도 저하 등 다양한 이유에 따라 슬러지 인발이 늦어져 SRT가 길어지는 경향이 있다. JB (MBR) 하수처리시설은 0.4 μm MF의 폴리올리핀계 평막을 도입하고 분기 1회 세정을 실시하고 있으며, 이 시설의 SRT는 8.6~61.8 day로 다른 시설보다 길게 운전하는 것으로 조사되었다. 이는 다음 절에서 언급될 MLSS가 가장 커 9,740~13,875 mg/L의 범위에서 운전되어 SRT가 커도 운영에 미치는 영향이 작기 때문이다 (Fig. 7).

2) MLSS

MLSS (활성슬러지 농도)는 폭기조 내에서 처리를 담당하는 활성슬러지 미생물 농도를 나타내는 지표이다. 활성슬러지법을 통한 하수처리에서는 미생물이 유기물을 분해섭취하기 때문에 처리에 관여하는 미생물 농도가 가장 중요한 하수처리시설 운전조건 중 하나이다.

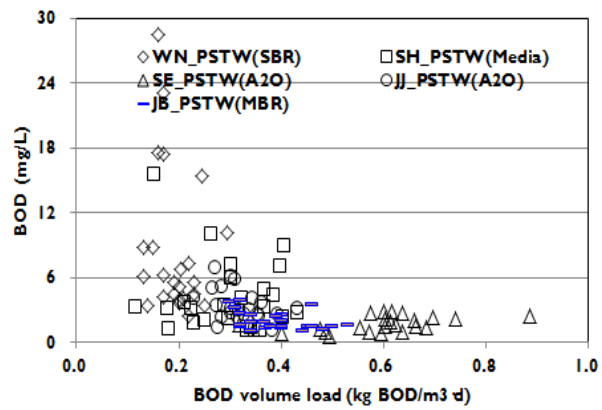
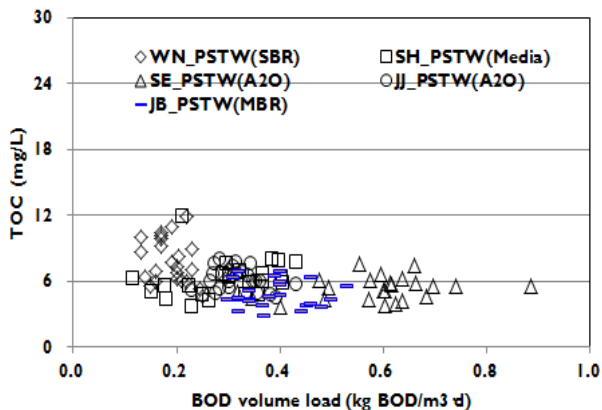
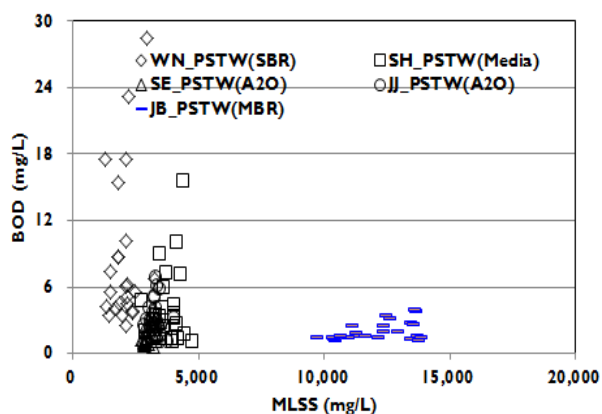
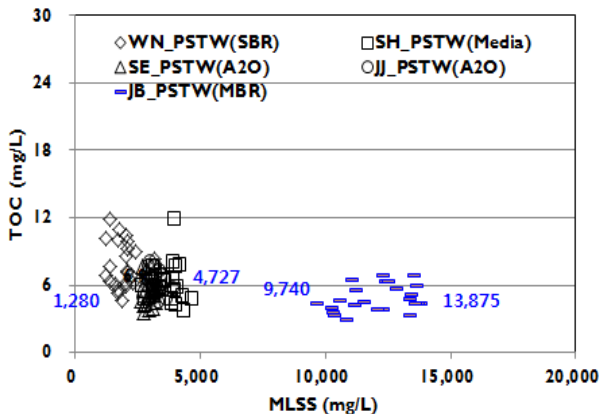
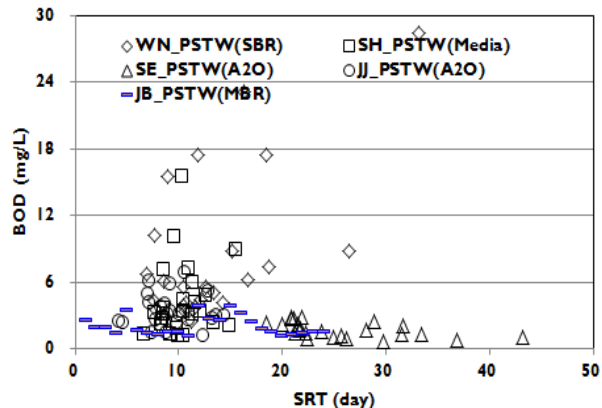
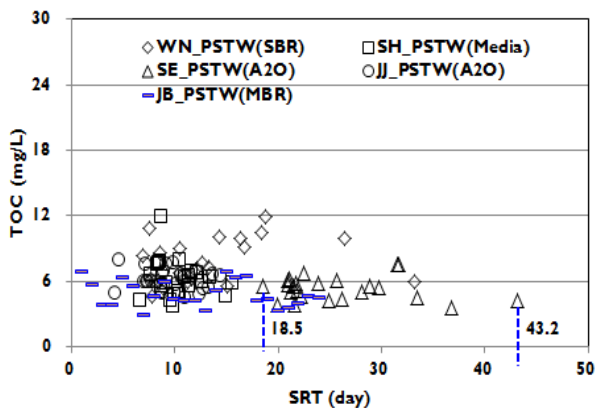
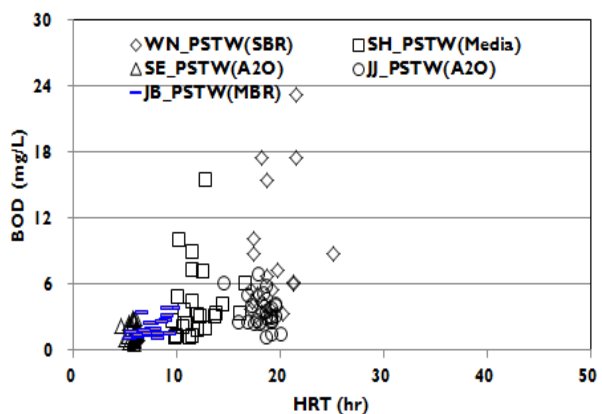
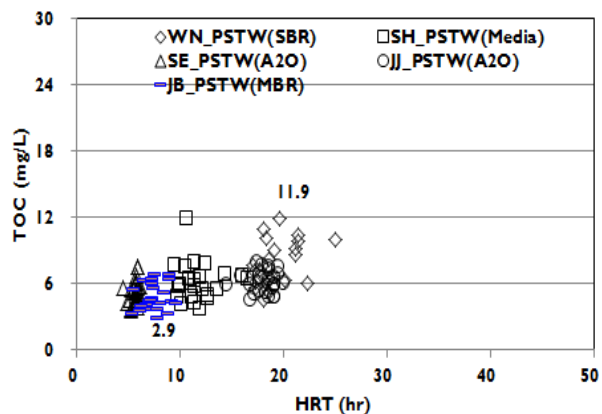
Table 5에서와 같이 A₂O 및 Media공법에서 MLSS는 2,000~5,000 mg/L, SBR공법은 2,000~3,000 mg/L의 범위에서 통상적으로 운전된다. 본 연구에서 이들 공법을 적용한 대상 하수처리시설에서는 1,280~4,727 mg/L의 범위에서 운전되어 이들 공법에서 적용하는 MLSS 운전조건 범위에서 운영되는 것으로 조사되었다. 또한 MBR공법을 적용한 JB 하수처리시설의 MLSS 설계기준은 5,000~15,000 mg/L이며, 본 연구기간 동안 조사된 JB 시설의 MLSS는 9,740~13,875 mg/L로써 설계기준 조건 내에서 운전되는 것으로 나타났다 (Fig. 7).

3) BOD용적부하

BOD용적부하는 공간부하 (Space loading) 또는 BOD

Table 5. Operating factors of sewage treatment technologies in PSTWs (KECO, 2013)

Classification	A ₂ O (4-stage BNR)	Media (DeNipho)	SBR (CSBR)	MBR
HRT (hr)	6~8	5~8	3~24	6
SRT (day)	10~40	10~25	-	30~40
MLSS (mg/L)	2,000~5,000	2,000~5,000	2,000~3,000	6,000~8,000
BOD volume load (kg BOD/m ³ ·d)	-	-	-	0.11~1.47
F/M ratio (kg BOD/kg MLSS·d)	0.1~0.2	0.05~0.2	0.15~0.5	0.02~0.2
Sludge return ratio (%)	20~50	30~50	-	100
Inner return ratio (%)	100~200	-	150~300	-



pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

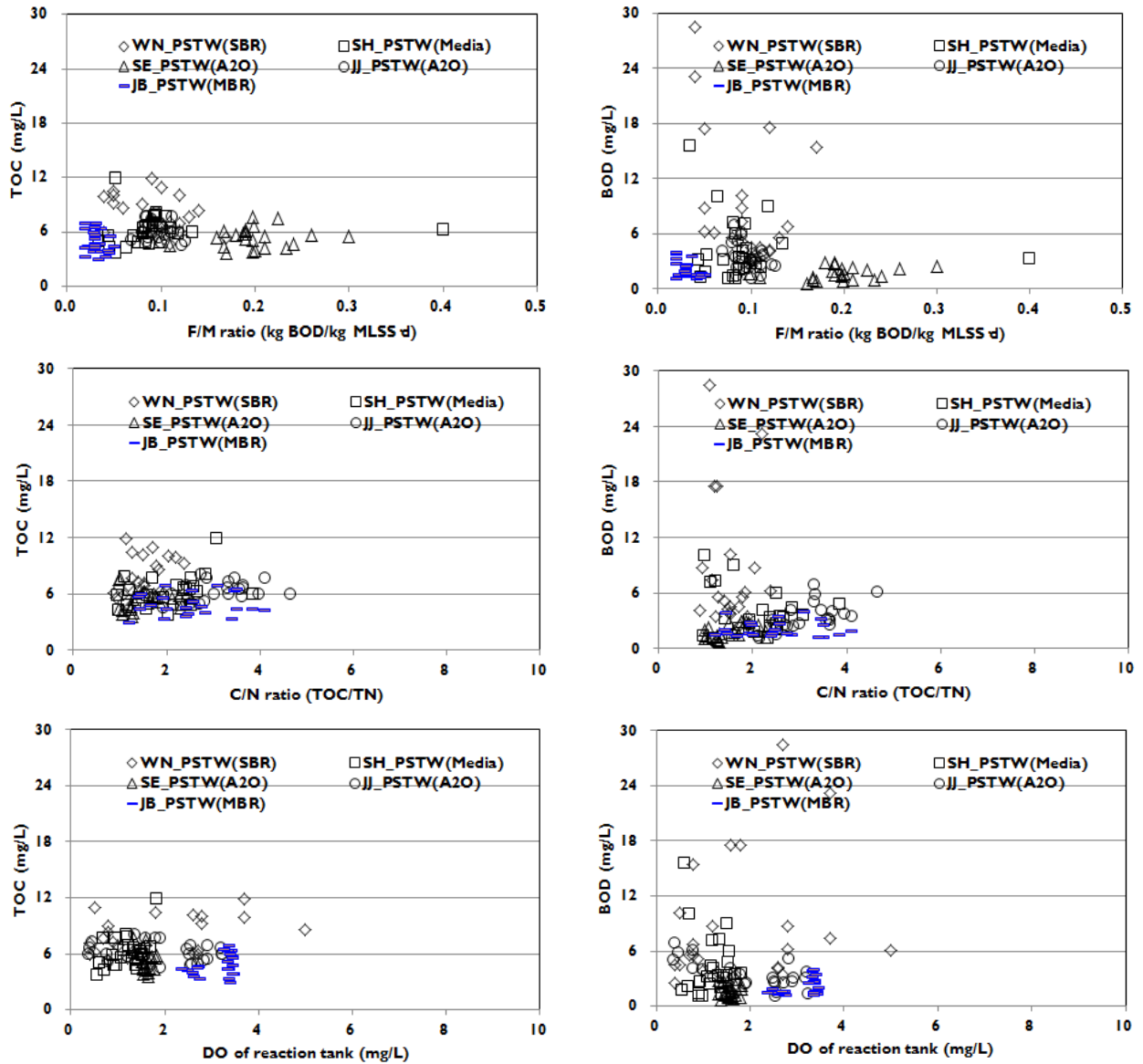


Fig. 7. Relation between operation factors and TOC·BOD concentration at reaction tank outflow or 2nd settling tank outflow of PSTWs. (In graphs, Concentration of TOC and BOD was analyzed at reaction tank outflow of WN PSTW (SBR) and JB PSTW (MBR), 2nd settling tank outflow of SH PSTW (Media) and SE PSTW (A₂O), and settling tank outflow of JJ PSTW (A₂O). Refer to Table 2 about sampling sites. Concentration of C/N (TOC/TN) was analyzed at reaction tank inflow sewage.).

부하와 같은 뜻이며, 폭기조 1 m³당 1일에 유입되는 BOD의 무게 (kg)로 나타낸다. BOD용적부하는 폭기조 (반응조)의 규모를 결정하는데 사용된다.

WN (SBR) 하수처리시설의 BOD용적부하는 설계 조건인 0.40 kg BOD/m³·day보다 낮은 0.13~0.30 kg BOD/m³·day의 범위에서 운영하고 있는 것으로 조사 되었다. SH 하수처리시설은 Media 공법으로 BOD용

적부하가 설계조건 0.28 kg BOD/m³·day이 0.12~0.43 kg BOD/m³·day의 범위 내에서 거동하도록 운영하고 있었다. SE 하수처리시설은 A₂O공법임에도 BOD용 적부하가 설계조건 0.32 kg BOD/m³·day보다 높은 0.32~0.89 kg BOD/m³·day로 운영되고 있었다. 또한 JB (MBR) 하수처리시설의 BOD용적부하는 일반적인 운전조건 0.11~1.47 kg BOD/m³·day의 범위 내인



0.30~0.53 kg BOD/m³·day로 운영하는 것으로 나타났다 (Fig. 7).

4) F/M(Food/Micro-organism) 비

F/M 비는 폭기조 내 혼합액 부유물질 (MLSS)을 1 kg 당 1일에 유입되는 BOD의 무게 (kg)로 나타낸 것이다.

조사대상 하수처리시설의 F/M (BOD/MLSS) 비에 있어서도 WN (SBR) 하수처리시설은 설계 F/M 비가 0.192 kg BOD/kg MLSS·day이었으나 실제 운영 F/M 비는 0.04~0.17 kg BOD/kg MLSS·day로 낮게 운영하는 것으로 조사되었다. SH (Media) 하수처리시설이 설계조건 0.05~0.2 kg BOD/kg MLSS·day 범위보다 다소 넓은 0.04~0.40 kg BOD/kg MLSS·day 범위에서 운영하는 것으로 조사되었다. SE (A₂O) 하수처리시설이 설계조건 0.13 kg BOD/kg MLSS·day보다 다소 높은 0.10~0.30 kg BOD/kg MLSS·day 범위에서 운영하는 것으로 조사되었다. JJ (A₂O) 하수처리시설은 설계조건 (0.11 kg BOD/kg MLSS·day) 보다 다소 낮은 값 (0.07~0.13 kg BOD/kg MLSS·day)으로 운영되었다. MBR공법을 적용하고 있는 JB 하수처리시설은 F/M 비를 0.020~0.051 kg BOD/kg MLSS·day로 낮게 유지하여 운영하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 실제 하수 유입 성상의 변환에 따라 운영조건을 처리에 적합하게 변경하여 운영하는 것으로 판단된다 (Fig. 7).

5) C/N(TOC/TN) 비

C/N 비가 낮은 저농도 하수의 질소제거를 위하여 여러 생물학적 탈질공법이 개발되어 현재 사용되고 있는 탈질공법으로 외부 유기물질 공급 (전자공여체)에 의한 C/N 비의 조절법이 가장 보편화되어 있다 (Lee et al., 1999). 일부 하수처리시설에서도 1차침전지 월류수에서 COD_{Cr}/TN 비는 1.24, BOD₅/TN 비는 0.43으로 생분해성 유기물질 농도가 질소 성분에 비해 낮은 것으로 조사된 사례도 있다 (Yoon, 2008).

조사대상 하수처리시설 일차침전지 또는 유량조정조 유출수의 C/N (TOC/TN) 비는 WN (SBR) 및 SE (A₂O) 하수처리시설에서 일정하게 0.9~2.5의 범위 내에서 운영하는 것으로 나타났다. 또한 SH (Media) 하수처리시설의 일차침전지 유출수에서 C/N 비가 0.9~3.8, JJ (A₂O) 하수처리시설의 유량조정조 유출수에서 C/N 비가 1.9~4.7, JB (MBR) 하수처리시설의 유량조정

조(분배조) 유출수에서 C/N 비가 1.2~4.1의 범위에서 조사되었다. 이들 C/N 비 범위에서 TOC 처리효율은 90% 이상 유지하는 것으로 나타났다 (Fig. 7).

6) DO

폭기조 (반응조)는 활성슬러지 미생물이 유기물질을 산화하고, 새로운 세포의 동화작용에 필요한 산소를 공급하고 폭기조 혼합액을 교반하기 위한 것이다. 하수처리시설에서 유량 및 수질은 항상 변동하므로 폭기조에서 안전하게 운전하기 위해서는 용존산소를 반응조 유입부에서 0.5~1.0 mg/L, 유출부에서는 1~2 mg/L 정도 유지하는 것이 좋다. 활성슬러지 공법에 사용되는 폭기장치는 크게 산기식과 기계식으로 구분하며 이러한 폭기장치는 활성슬러지에 산소를 공급시켜야 함은 물론 폭기조를 혼합시켜 폭기조 내의 MLSS가 침전되지 않도록 하는 역할을 해야 한다.

조사대상 하수처리시설에서 2차침전지 또는 반응조 유출수의 TOC 농도는 2.9~11.9 mg/L로 조사되었다. 이때 SE (A₂O) 하수처리시설의 2차침전지 유출수 TOC 농도는 3.6~7.6 mg/L이었고 이 때 반응조 DO 농도는 1.3~1.8 mg/L로 매우 안정하게 운영하는 것으로 나타났다. JB (MBR) 하수처리시설의 반응조 유출수 TOC 농도는 가장 낮은 2.9~6.9 mg/L의 범위에서 조사되었고 이 때 DO는 2.5~3.5 mg/L의 범위에서 운영하는 것으로 조사되었다. 또한 Media공법인 SH 하수처리시설의 반응조에서 DO는 2 (0.6~1.8) mg/L 이내에서 운영하는 것으로 조사되었고 2차침전지 유출수에서 TOC 농도는 다소 높은 3.7~11.9 mg/L의 범위로 나타났다 (Fig. 7).

3.3 하수처리시설 방류수 TOC 처리를 위한 운영관리 방안 고찰

현재 방류수의 유기물질 지표로 BOD 및 COD_{Mn}을 채택하고 있으나, COD 망간법은 산화력 부족으로 난분해성 유기물질 측정이 곤란하며, 공공수역 내 2011~2015년 평균 113개 중권역 대표지점 COD 목표기준 달성률이 27.0% 수준으로 유기물질에 대한 달성률이 미흡하여 유기물질 관리에 대한 필요성이 대두되었다 (NIER, 2017). 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」에서 ‘수질 및 수생태계 환경기준’의 하천 및 호소 생활환경기준에는 COD_{Mn}의 한계를 극복하기 위해 이

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

Table 6. Draft TOC standard of effluent by application stage in PSTWs (Unit : mg/L)

Classification		Current BOD	Current COD _{Mn}	Draft TOC
PSTWs above 500 m ³ /day facility capacity	I region	5	20	15
	II region	5	20	15
	III region	10	40	25
	IV region	10	40	25
PSTWs from 50 to 500 m ³ /day facility capacity		10	40	25
PSTWs below 50 m ³ /day facility capacity		10	40	25

Table 7. Operation factors and conditions of reaction tank in relation to TOC concentration of 2nd settling tank effluent(or reaction tank outflow) in target PSTWs

Classification	2 nd secondary settling tank effluent TOC (mg/L)	Temp. (°C)	pH	DO (mg/L)	MLSS (mg/L)	HRT (hr)	SRT (day)	F/M ratio (kg BOD/MLSS·day)	BOD volume load (kg BOD/m ³ ·day)	C/Nratio
WN_PSTW (SBR)	4.6~11.9	14.1~28.3	6.6~7.1	0.4~5.0	1,280~3,250	17.2~25.2	6.9~33.2	0.040~0.170	0.130~0.295	0.9~2.4
SH_PSTW (Media)	3.7~11.9	11.2~26.2	6.4~6.8	0.6~1.8	2,740~4,727	9.7~16.7	6.6~15.5	0.035~0.400	0.116~0.432	0.9~3.8
SE_PSTW (A ₂ O)	3.6~7.6	13.2~28.0	6.4~6.7	1.3~1.8	2,700~3,470	4.7~6.3	18.5~43.2	0.098~0.300	0.317~0.885	1.0~2.5
JJ_PSTW (A ₂ O)	4.5~8.0	12.8~26.6	6.5~7.3	0.4~3.2	2,835~4,010	14.6~20.1	4.2~14.4	0.069~0.126	0.229~0.432	1.9~4.7
JB_PSTW (MBR)	2.9~6.9	12.6~21.7	6.9~7.2	2.4~3.5	9,740~13,875	5.5~9.8	8.6~61.8	0.020~0.051	0.300~0.530	1.2~4.1

미 TOC 항목을 신규로 도입 (2013.1.1)하였고, 2016년부터 COD_{Mn}지표를 폐지하여 TOC로 전환하는 것으로 되어 있다. Table 6과 같이 공공하수처리시설에서 유기물질 관리지표인 COD 항목을 대체하여 TOC 항목을 도입하는 것에 따른 영향을 최소화하고자 방류수에 대한 TOC 모니터링을 통하여 효율적인 운영관리 및 시설개선 방안을 도출하고 효율적으로 대응하는 것이 필요하다.

방류수 수질기준 중 BOD 항목에 맞게 설계된 하수처리시설에서 TOC 처리에 적합하기 위해 TOC 모니터링을 수행하였고 그 결과에 따르면 BOD 등 유기물질을 효과적으로 처리하는 하수처리 공정에서는 TOC도 효과적으로 처리하는 것으로 조사되었다. 생물학적 처리공정에서 활성슬러지 반응조 내 HRT, SRT, MLSS, BOD용적부하, F/M 비 등 운전조건에 대해 같은 공법이라도 개별 하수처리시설의 유입 하수특성, 설계에 따라 적용하는데 차이가 있을 수 있으며, TOC 모니터링을 통하여 개별 하수처

리시설의 공정별 효과적인 운영조건을 도출하는 것이 필요하다. A₂O공법, SBR공법, Media공법, MBR공법을 적용하여 현재 가동 중인 하수처리시설에 대해 운영조건을 조사하였고 Table 7과 같이 예시적인 범위를 정하여 효율적인 운영조건을 제시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수처리시설 방류수 수질기준에서 유기물질 관리지표로 TOC 기준을 도입하였을 때 효율적인 공정 운영관리 방안을 마련하기 위해 A₂O공법, Media공법, SBR공법, MBR공법 등 5개 공공하수처리시설을 대상으로 공정별 처리수질을 조사하였다. 또한, TOC 처리효율과 하수처리시설 운영인자와의 관계를 분석하여 효율적인 운영조건을 제시하였다.

대상 하수처리시설의 처리수질을 조사한 결과 TOC 처리효율은 92.6~96.0%로 높게 나타났으며, TN 처리



효율은 70.0~85.7%로 다른 항목에 비해 다소 낮게 나타났다. 이들 시설의 BOD/TOC 비율은 유입수 2.0에서 0.3로 크게 낮아져 대부분은 유기물질은 산화되는 것으로 나타났으며, COD_{Mn}/TOC 비율은 유입수 1.2에서 방류수 1.5로 약간 증가 하였으나 COD_{Cr}/TOC 비율은 유입수 3.5에서 방류수 2.9로 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 대상 하수처리시설 TOC 유입수질은 30.5~271.4 mg/L 범위에서 조사되어 하수처리시설 처리구역의 하수 유입특성에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 개별 하수처리시설의 유입 하수특성 및 설계 조건에 따라 생물학적 처리공정에서 활성슬러지 반응조 내 HRT, SRT, MLSS, BOD-용적부하, F/M 비 등 운전조건을 적용하는데 차이가 있으나, 생물학적 처리 후 방류수 TOC 농도는 2.0~7.9 mg/L로 매우 양호한 처리수준을 유지하는 것으로 조사되었다. 이는 III~IV지역 TOC 기준(안)(25 mg/L 이하)을 만족하는 것이다.

본 연구에서 제시한 운영조건의 범위에서 A₂O공법, SBR공법, Media공법, MBR공법 등 하수처리시설을 운영할 경우 TOC 방류수 수질기준을 만족시킬 수 있을 것으로 판단되며, 향후 하수처리시설의 배수구역 구분(합류식 및 분류식), 단독처리 및 연계처리 구분(분뇨, 산업폐수, 가축분뇨, 침출수 등), 지역별 처리시설 구분, 청천시 및 강우시 구분 등 다양한 특성을 고려하여 공정별 TOC 거동분석, 운전 방법론, 간이하수처리시설 운영 등 추가적인 연구를 수행하는 것이 필요하다. 또한 공공하수처리시설 방류수에서 TOC 기준을 준수할 수 있도록 TOC를 처리하기 위한 효율적인 공공하수처리시설 TOC 운영관리 가이드라인을 마련하는 것이 필요하다.

약어정리

- A₂O : Anaerobic-Anoxic-Aerobic
- BDOC : Biodegradable dissolved organic carbon
- BOD : Biochemical oxygen demand
- C/N : Carbon/Nitrogen (TOC/TN)
- COD : Chemical oxygen demand
- (C)SBR : (Continuous) Sequencing batch reactor
- DO : Dissolved oxygen
- DOC : Dissolved organic carbon
- F/M : Food/Micro-organism

- HRT : Hydraulic retention time,
- KECO : Korea Environment Cooperation
- MBR : Membrane bioreactor
- MLSS : Mixed liquor suspended solids
- MOE : Ministry of Environment
- NH₃-N : Ammonium nitrogen
- NIER : National Institute of Environmental Research
- NPOC : Non-purgeable organic carbon
- ORP : Oxidation-reduction potential
- pH : Potential of hydrogen
- PO₄-P : Phosphate phosphorus
- PSTW : Public sewage treatment work
- SRT : Solids retention time
- SS : Suspended solids
- TN : Total nitrogen
- TOC : Total organic carbon
- TP : Total phosphorus

사 사

본 연구는 국립환경과학원의 지원으로 수행되었습니다. (NIER-RP2017-321)

References

Cha, W.S., Kim, J.W., and Choi, H.C. (2003). Characterization of biodegradable dissolved organic carbon(BDOC) contained in wastewater effluents, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 25(2), 253-257.

Cho, Y.B., Oh, Y.K., Shin, D.C., and Park, C.H. (2014). Distribution of total organic carbon and correlations between organic matters of sewage treatment plants, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 17(4), 207-214.

Jeong, D.H, Choi, I.C., Cho, Y.S., Ahn, K.H., Chung, H.M., Kwon, O.S., Park, H.W., Shin, H.S., and Hur, J. (2014). Characteristics of TOC in Effluent Discharge from Public Sewage Treatment Works in Korea, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 28(6), 657-668.

Katsoyiannis, A. and Samara, C. (2007). The fate of the fate of dissolved organic carbon(DOC) in the wastewater treatment process and its importance in the removal of wastewater contaminants, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 14(5), 284-292.

- pp. 479-485
- pp. 487-497
- pp. 499-505
- pp. 507-515
- pp. 517-526
- pp. 527-533
- pp. 535-550
- pp. 551-557
- pp. 559-572
- pp. 573-581

- Korea Environment Cooperation(KECO). (2013). Introduction of advanced sewage treatment technologies.
- Lee, J.H., Koh, E.O., Kim, M.W., and Park, T.J. (1999). Effects of nitrogen removal with C/N ratio and internal recycle rate in high-strength wastewater using ICBR, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 21(8), 1529-1536.
- McDowella, W.H., Zsolnay, A., Aitkenhead-Peterson, J.A., Gregorich, E.G., Jones, D.L., Jödemanne, D., Kalbitz, K., Marschner, B., and Schwesig, D. (2006). A comparison of methods to determine the biodegradable dissolved organic carbon from different terrestrial sources, *Soil Biol. Biochem.*, 38, 1933-1942.
- Ministry of Environment(MOE). (2015). Public analytical methods for water pollution.
- Ministry of Environment(MOE). (2018). Explanatory document for “Draft introduction plan of TOC standard for public sewage treatment works” (unpublished).
- National Institute of Environmental Research(NIER). (2011). Environmental impact analysis according to determining environmental criteria for TOC.
- National Institute of Environmental Research(NIER). (2012). A study on master plan for introduction of TOC regulatory standard.
- National Institute of Environmental Research(NIER). (2014). A study on investigation of domestic TOC source unit for application of total water pollution load management system.
- National Institute of Environmental Research(NIER). (2015a). A study on determining TOC standard for application of sewage treatment plant effluent (II).
- National Institute of Environmental Research(NIER). (2015b). A study on determining TOC standard for application of comprehensive environmental management system.
- National Institute of Environmental Research(NIER). (2017). Evaluation of attainment ratio on water quality goal of river and reservoir from 2011 to 2015 in Korea.
- Servais, P., Anzil, A., and Ventresque, C. (1989). Simple method for determination of biodegradable dissolved organic carbon in water, *Appl. Environ. Microbiol.*, 55(10), 2732-2734.
- Servais, P., Billen, G., and Hascoët, M.C. (1987). Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters, *Water Res.*, 21(4), 445-450.
- Son, H.J., Jung, C.W., Choi, Y.I., and Bae, S.D. (2006). Formation characteristics of BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} by ozonation, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 28(12), 1274-1279.
- Son, H.J., Roh, J.S., and Kang L.S. (2004). Determination of BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} using batch bio-reactor, *J. Korean Soc. Water Qual.*, 20(4), 357-364.
- Weinrich, L.A., Jemba, P.K., and Giraldo, E., LeChevallier, M.W. (2010). Implications of organic carbon in the deterioration of water quality in reclaimed water distribution systems, *Water Res.*, 44, 5367-5375.
- Yoon, C.H. (2008). The characteristics of microbial community structure by an addition of external carbon source in BNR process for low C/N ratio sewage treatment, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 30(8), 831-838.