



공공하수처리시설 방류수 TOC에 영향을 주는 요인 분석

Analysis of factors affecting effluent TOC in publicly owned treatment works

강성주¹·강병준¹·박규홍^{1*}·정동환²·이원석²·정현미²

Seongju Kang¹·Byongjun Kang¹·Kyoohong Park^{1*}·Donghwan Jeong²·Wonseok Lee²·Hyenmi Chung²

¹중앙대학교 토목공학과, 서울시 동작구 흑석로 84, 06974

²국립환경과학원 환경기반연구부, 인천시 서구 환경로 42, 22689

¹Department of Civil Engineering, Chung-Ang University, 40 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, Republic of Korea, 06974

²Environmental Infrastructure Research Department, National Institute of Environmental Research, 42 Hwangyong-ro, Seogu, Incheon, Republic of Korea, 22689

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 141-150

pp. 009-016

pp. 009-016

ABSTRACT

Total organic carbon(TOC) was introduced as the water quality index of the rivers and lakes in 2013. This paper evaluated factors affecting effluent TOC concentrations and treated and discharged loads of existing publicly owned treatment works(POTWs). For selected POTWs with greater treatment capacity than 500m³/day, factorial analysis was used to consider effects of kinds of biological treatment processes, inflow of other types of wastewater(industrial, livestock, landfill leachate wastewater, etc.) with domestic wastewater, sewer separation rate, and effluent discharging zones in which different effluent criteria applied. As a result, those factors did not show significant effect on effluent TOC concentration of POTWs in effluent discharging zone I and II. However, In effluent discharging zone III and IV, kinds of biological treatment processes, the inclusion of other waste in influent of domestic wastewater, and the sewer separation rate were significant factors. The treated TOC load in POTWs was also not affected significantly by the variables set in this study. On the other hand, those three factors influenced significantly on the TOC load discharged to water bodies. The sum of factorial effects and the contribution rate of three factors to the discharged TOC load was 60.23 and 41%, 59.57 and 41%, and 42.04 and 18%, respectively.

Key words: Total organic carbons, Publicly owned treatment works, Effluent, Treated TOC load, Discharged TOC load, Factorial analysis

주제어: 총유기탄소, 공공수처리시, 유출수, TOC 처리부하, TOC 유출부하, 요인분석

1. 서 론

하수 내의 유기물은 단백질, 탄수화물, 지방과 휴믹물 질 등 여러 가지 물질로 구성되어 있어 이를 개별적으로 측정하여 유기물의 농도를 구하는 것은 효율적이지 않

기 때문에, 유기물이 산화될 때 소비되는 산소요구량(BOD_s, COD_{Mn}, COD_{Cr})을 사용하여 유기물의 농도를 간접적으로 판단하고 있다. 우리나라는 생분해성 유기물질을 대표하는 지표로 BOD_s와 화학적인 산화에 의한 유기물질 지표로서 COD_{Mn}를 사용하고 있다. 국외의 경우에는 1960~1970년대부터 유기물질의 증가현상을 규명하기 위한 다양한 연구들이 수행되었으며 유럽, 북미

Received 1 February 2019, revised 2 April 2019, accepted 4 April 2019.

*Corresponding author: Kyoohong Park (E-mail: kpark@cau.ac.kr)

지역에서 TOC(Total Organic Carbon), DOC(Dissolved Organic Carbon) 증가에 대한 원인을 연구한 사례들이 보고되고 있다. 공공하수처리시설에서 생물학적으로 처리된 방류수에 존재하는 유기물질은 용해된 천연 유기물, 수용성 미생물의 생성물, 내분비 교란 화합물, 의약품 및 개인위생용품을 포함하여 다양한 구조와 기원을 갖는 유기 화합물의 혼합물로 구성된다 (Esparza-Soto et al., 2011; Fatta-Kassinos et al., 2011a; Michael-Kordatou et al., 2015; Tran et al., 2015; Yu et al., 2015). 방류수 내 유기물은 공공수역에서도 지속적으로 잔류하는데, 최근에는 첨단 처리기술을 적용하여 방류수 내 용존 유기물을 제거하는 것에 관심이 증가하여, 막 여과, 활성탄 흡착, 음이온 교환수지 처리 및 첨단 화학 산화공정의 활용에 대한 상세한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Cheng et al., 2017; Chevremont et al., 2012, 2013; Fatta-Kassinos et al., 2011b; Rodriguez-Chueca et al., 2014; The White House, 2014).

최근 국내에서는 최근 하천 및 호소 등 공공수역의 난분해성 유기물질의 증가와 처리시설의 방류에 따른 영향, 관리수단 고도화, 분석의 신속·편리성, 국제적 통용성 측면에서 과연 BOD 중심의 유기물질 관리 정책의 지속성 여부와 함께, 난분해성물질의 관리를 위한 COD_{Mn} 등 기존 유기물 지표의 적정성에 대한 부정적인 의견이 다수 있었고 새로운 지표에 대한 요구가 제기된 바 있다 (KEI, 2015; NIER, 2011). 이 중 대표적인 대안 항목으로 TOC가 새롭게 부각되면서 이에 대한 적용가능성 및 타당성을 확인하기 위한 활발한 연구가 진행되기 시작하였다 (Jeong et al., 2014; NIER, 2011, 2014, 2015). 국내·외의 수질지표로서의 TOC 도입추세에 따라 난분해성 유기물 및 복합 오염원의 통합적인 관리를 위한 공공하수처리시설의 TOC 관련 자료의 지속적인 축적과 모니터링은 필수불가결하며 이를 바탕으로 유기물질의 통합적인 관리가 이루어질 것으로 보인다.

본 논문에서는 공공하수처리시설의 설계, 관리 및 운영요인 데이터의 규모 및 수준을 고려하여 실험계획법의 요인배치법을 사용하여 처리공법, 하수배제방식, 축산폐수나 침출수, 산업폐수 등의 연계처리의 영향 유무와 정도, 방류수역의 영향을 분석하여 그 정도에 대한 평가를 시도하고자 한다. 500 m³/일 이상의 66개 공공하수처리시설에서 고려요인과 해당수준이 일치하는 처리시설들을 선별한 후 방류수 TOC 농도,

TOC 처리부하량, TOC 방류 부하량의 영향분석을 위해 2²형으로 요인배치법에 따른 분석을 수행하였다.

2. 연구방법

본 연구에서 사용된 요인배치법(factorial design)은 인자의 각 수준의 모든 조합에 대하여 실험을 행하는 것으로 시험순서는 랜덤하게 정한다. 인자의 수에 따라서 인자는 하나의 경우는 일원배치법(one-way factorial design), 인자가 둘인 경우에는 이원배치법(two-way factorial design), 그리고 인자가 세 개 이상인 경우는 다원배치법(multi-way factorial design)이라고 부른다. 인자수가 n 개이고 각 인자가 다같이 2수준인 경우에는 2ⁿ형 요인배치법(2ⁿ factorial design), 3수준인 경우에는 3ⁿ형 요인배치법이라고 부른다. 만약 p 개의 인자가 2수준이고 q 개의 인자는 3수준이며 2ⁿ3^q형 요인배치법이라고 부른다. 이처럼 인자 각 수준의 모든 조합에서 실험이 행해지며, 실험순서가 완전히 랜덤하게 행해지는 실험계획법을 완비형배치법이라고 부르기도 한다 (Park and Kim, 2013). 최근 환경실험에서 통계분석결과 뿐만 아니라 요인 수의 최적화를 위한 실험 설계에 요인분석법이 많이 사용되고 있다 (Kim and Park, 2013; Park and Chang, 2007).

본 논문에서는 (NIER, 2014, 2015)의 상세 분류기준에 따라 Fig. 1과 같이 분류된 중·대규모(500 m³/일 이상)의 공공하수처리시설 66개소의 데이터를 기반으로 분석하였다. 선정된 요인은 처리공법의 계열, 연계처리 유무, 분류식화율, 방류수지역, 그리고 각 요인들의 교호작용도 요인배치 구성에 따라 고려하였으며, 데이터의 수준은 각각 2수준으로 일원화하였다. TOC의 데이터는 실험 설계에 고려된 66개 공공하수처리시설에서 2년간 총 6회로 나누어서 채수·분석된 값을 이용하였다.

데이터 요인을 선정된 후 요인배치법으로 분석하기 위해서 Table 1에 나타난 바와 같이 3세트의 데이터를 동일한 2수준계로 각각 부유공법과 부착공법(처리공법), 연계처리의 실시여부(연계처리 유무), 분류식화율 0%와 100%로 고려하였다.

기본적으로 2개의 요인과 2개의 수준을 고려한 2²형 요인배치법의 형태는 총 4가지의 처리조합을 가지게 되며, 이는 요인분석의 종속변수로 사용되는 방류수 TOC 농도에 대해 요인배치법에 따른 분석을 위한 데이터 matrix를 정리하였다. 본 논문에서는 각각의 실

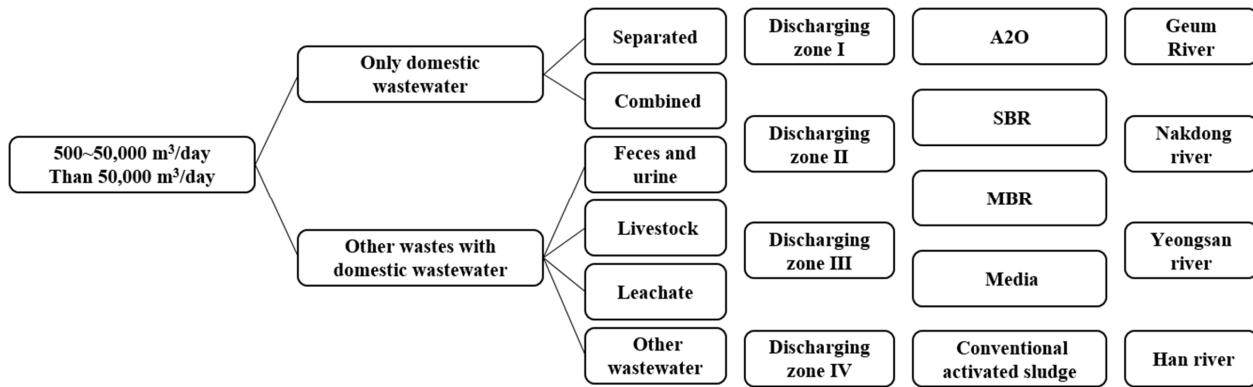


Fig. 1. Classification of POTWs with greater capacity than 500 m³/day (NIER, 2014, 2015).

Table 1. 2³ factorial design selected using raw data

Factors considered	Levels of raw data	2-level classification of raw data	
Biological treatment method	A2O, SBR, oxidation ditch, conventional activated sludge, advanced activated sludge, MBR, Media, SMMIAR, contact oxidation	Suspended growth process (A2O, SBR, oxidation ditch, conventional activated sludge, advanced activated sludge)	Attached growth process (MBR, Media, SMMIAR, contact oxidation)
Other wastes with domestic wastewater	Feces and urine, Livestock, Leachate, other wastewater, and only domestic wastewater	Presence of other wastewater than domestic wastewater	Absence of other wastewater than domestic wastewater
Sewer separation rate (%)	0, 30, 45, 50, 90, 100	0	100

험 조건에 맞는 처리시설을 선별하여 2년간 총 6번의 TOC 수질 분석데이터의 평균값을 사용하였다.

TOC 방류수 농도 값은 방류수지역에 따라 수질기준이 상이하므로 방류수지역 I, II지역과 III, IV지역으로 구분하여 요인배치법을 적용하였다¹⁾(I, II지역에 해당하는 처리시설은 31개, III, IV지역에 해당하는 처리시설은 35개임). 2수준의 3가지 요인(처리공법, 연계처리 유무, 분류식화율)의 실험을 2²형 요인배치법의 형태로 구성하기 위해서는 각 지역마다 3번의 실험이 필요하며, 방류수지역을 I, II와 III, IV으로 구분하여 각각 총 6번의 실험을 시행하는 것에 해당된다. 중·대규모(500 m³/일 이상)의 66개 공공하수처리시설 중에서 고려요인과 해당수준이 처리시설들을 선별한 후 Tables 2~7과 같이 2²형으로 요인을 배치하였고, 종속변수(방류수 TOC 농도)의 6차분의 평균값들도 함께 나타내었다.

1) 현행 공공하수처리시설의 방류수수질기준이 I, II지역에서는 BOD 5 mg/L와 COD 20 mg/L이고, III, IV지역에서는 BOD 10 mg/L와 COD 40 mg/L이 적용되고 있다.

TOC 방류수 농도는 각 방류수지역별로의 수질기준을 만족하면 되는 것이기에 처리용량, 설계용량에 따라 방류유량도 바뀌므로, 종속변수로 방류수 TOC 농도만 고려하기보다 유량도 고려한 TOC 부하량을 종속변수로 사용해보려한다. TOC 처리부하량의 관점에서 방류수 TOC 농도와 마찬가지로 ‘처리공법’, ‘연계처리’, ‘분류식화율’을 그대로 선정하였다. 수준의 수도 동일하게 2수준계로 각각 부유와 부착, 연계처리의 유무, 분류식화율 0%와 100%으로 고려하여 요인배치실험을 하였다. TOC 처리부하량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{TOC처리 부하량} = (\text{유입 TOC농도} - \text{방류 TOC농도}) \times \text{실제 처리 유량} \quad (1)$$

따라서, 처리부하량을 요인배치법의 처리조합으로 배치하기 위해 실제 처리량이 비슷한 처리시설을 선정하였다. 또한, 반복수는 같으나 해당하는 처리시설이 1개씩 배치하였다. 2개의 요인과 2개의 수준을 고려한 2²형 요인배치법의 형태로서, 각각의 실험 조건에 맞는

pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 141-150
pp. 009-016
pp. 009-016

Table 2. 2² factorial design of factors of biological treatment method and inclusion of other wastewater with domestic wastewater affecting effluent TOC concentration in POTWs discharging to region I and II

Biological treatment method (X ₁)	Other wastes except domestic wastewater (X ₂)	The number of POTWs	Mean values of effluent TOC concentration (mg/L) (Y ₁)
Suspended growth	Yes	13	5.77
Suspended growth	No	7	6.29
Attached growth	Yes	7	5.21
Attached growth	No	4	6.37

Table 3. 2² factorial design of factors of biological treatment method and sewer separation rate affecting effluent TOC concentration in POTWs discharging to region I and II

Biological treatment method (X ₁)	Sewer separation rate % (X ₃)	The number of POTWs	Mean values of effluent TOC concentration (mg/L) (Y ₂)
Suspended growth	100	8	6.12
Suspended growth	0	9	6.02
Attached growth	100	5	5.07
Attached growth	0	3	5.78

Table 4. 2² factorial design of factors of sewer separation rate and inclusion of other wastewater with domestic wastewater affecting effluent TOC concentration in POTWs discharging to region I and II

Other wastes except domestic wastewater (X ₂)	Sewer separation rate (%) (X ₃)	The number of POTWs	Mean values of effluent TOC concentration (mg/L) (Y ₃)
No	100	7	6.18
No	0	3	6.16
Yes	100	6	5.17
Yes	0	9	5.89

Table 5. 2² factorial design of factors of biological treatment method and inclusion of other wastewater with domestic wastewater affecting effluent TOC concentration in POTWs discharging to region III and IV

Biological treatment method (X ₁)	Other wastes except domestic wastewater (X ₂)	The number of POTWs	Mean values of effluent TOC concentration (mg/L) (Y ₄)
Suspended growth	Yes	10	7.23
Suspended growth	No	8	7.21
Attached growth	Yes	5	7.93
Attached growth	No	5	3.79

Table 6. 2² factorial design of factors of biological treatment method and sewer separation rate affecting effluent TOC concentration in POTWs discharging to region III and IV

Biological treatment method (X ₁)	Sewer separation rate (%) (X ₃)	The number of POTWs	Mean values of effluent TOC concentration (mg/L) (Y ₅)
Suspended growth	100	3	7.97
Suspended growth	0	10	7.05
Attached growth	100	5	6.21
Attached growth	0	3	4.95



Table 7. 2² factorial design of factors of sewer separation rate and inclusion of other wastewater with domestic wastewater affecting effluent TOC concentration in POTWs discharging to region III and IV

Other wastes except domestic wastewater (X ₂)	Sewer separation rate (%) (X ₃)	The number of POTWs	Mean values of effluent TOC concentration (mg/L) (Y ₆)
No	100	3	5.23
No	0	6	6.07
Yes	100	5	7.85
Yes	0	7	6.99

Table 8. 2² factorial design of factors of biological treatment processes and inclusion of other wastewater with domestic wastewater affecting treated and discharged TOC loads in POTWs

POTWs	Treatment capacity (m ³ /day)	Biological treatment method (X ₁)	Other wastes except domestic wastewater (X ₂)	Mean values of treated TOC loads (kg/day) (Y ₁)	Mean values of discharged TOC loads (kg/day) (Y ₁)
A plant	11,344	Suspended growth	Yes	890.47	61.85
B plant	13,069	Suspended growth	No	714.07	127.56
C plant	13,503	Attached growth	Yes	711.37	77.94
D plant	13,956	Attached growth	No	1,251.15	65.24

Table 9. 2² factorial design of factors of biological treatment process and separation rate affecting treated and discharged TOC loads in POTWs

POTWs	Treatment capacity (m ³ /day)	Biological treatment method (X ₁)	Sewer separation rate (%) (X ₃)	Mean values of treated TOC loads (kg/day) (Y ₂)	Mean values of discharged TOC loads (kg/day) (Y ₂)
B plant	13,069	Suspended growth	0	714.07	127.56
D plant	15,622	Suspended growth	100	1365.22	58.77
E plant	10,360	Attached growth	0	791.75	47.16
F plant	14,625	Attached growth	100	1011.49	64.94

Table 10. 2² factorial design of factors of sewer separation rates and inclusion of other wastewater with domestic wastewater affecting treated and discharged TOC loads in POTWs

POTWs	Treatment capacity (m ³ /day)	Other wastes except domestic wastewater (X ₂)	Sewer separation rate (%) (X ₃)	Mean values of treated TOC loads (kg/day) (Y ₃)	Mean values of discharged TOC loads (kg/day) (Y ₃)
F plant	14,625	No	100	1011.49	64.94
B plant	13,069	No	0	714.07	127.56
C plant	13,503	Yes	100	711.37	77.94
G plant	11,400	Yes	0	1,160.73	48.41

처리시설을 선별하여 2년간 총 6번(반복)의 TOC 수질 분석데이터의 평균 처리부하량 값을 구하여 요인을 배치하였다. 중·대규모(500 m³/일 이상)의 66개 공공하수처리시설에서 방류수지역별 요인배치를 위한 데이터가 부족하기 때문에 방류수지역은 따로 구분하지

않고 요치배치를 구성하였다. 2²형 요인배치법을 위한 정보와 데이터의 값들을 Table 8~10에 나타내었다.

TOC처리부하량 뿐 아니라 TOC방류 부하량에 미치는 영향에 대해서도 같은 방법으로 알아보기 위해 Table 8~10에 함께 표현하였다. TOC처리부하량과

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 141-150

pp. 009-016

pp. 009-016

Table 11. Information on the POTWs used in the factorial design for dependent variables of treated and discharged TOC loads

POTWs	Treatment capacity (m ³ /day)	Biological treatment method	Other wastes except domestic wastewater	Discharge region	Sewer separation rate (%)
A plant	11,344	A2O	Leachate 77m ³ /day	II	0
B plant	13,069	A2O	Not included	IV	0
C plant	13,503	MBR	Leachate 80m ³ /day	II	100
D plant	13,956	Contact oxidation	Not included	III	100
D plant	15,622	Oxidation ditch	Not included	I	100
E plant	10,360	Contact oxidation	Not included	III	0
F plant	14,625	MBR	Not included	I	100
G plant	11,400	A2O	Livestock wastewater 150m ³ /일	I	0

TOC방류 부하량에 미치는 하수처리시설의 조건의 영향을 파악하기 위해 사용된 하수처리시설의 기본 정보를 Table 11에 나타내었다.

분석의 반복수(6회분의 데이터) $r = 6$ 이므로 어느 정도 신뢰할만한 양의 데이터를 확보한 것으로 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 방류수 TOC 농도에 미치는 영향 요인 분석

공공하수처리시설의 설계 및 운영 요인과 방류수 TOC 농도간의 상관관계를 2²요인배치법을 이용하여 분석하였다. 실험결과는 Table 12에 정리하였다. 채수

Table 12에 나타난 결과에 의하면, 방류수지역 I, II에 해당하는 공공하수처리시설에서는 방류수 TOC 농도에 영향을 미치는 처리공법, 연계처리 유무, 분류식화울의 유의미한 요인을 확인할 수 없었던 반면, 방류수지역 III, IV에 해당하는 공공하수처리시설에서는 방류수 TOC 농도에 영향을 미치는 처리공법, 연계처리 유무, 분류식화울 유의미성을 확인할 수 있었다.

Table 12. Effects of factors affecting effluent TOC concentration and F-test results

Discharge region	Factors considered (Level 2)	Effects of factors	F-test results	
I, II	Biological treatment method	-0.24	No significant factors	
	Other wastes except domestic wastewater	-0.84		
	Interaction	-0.32		
	I, II	Biological treatment method	-0.64	No significant factors
		Sewer separation rate	-0.31	
		Interaction	-0.40	
III, IV	Other wastes except domestic wastewater	-0.64	No significant factors	
	Sewer separation rate	-0.35		
	Interaction	-0.37		
	III, IV	Biological treatment method	-1.36	Significant at 95% level
		Other wastes except domestic wastewater	2.09	Significant at 99% level
		Interaction	2.06	Significant at 99% level
Biological treatment method		-1.93	Significant at 99% level	
Sewer separation rate		1.09	Significant at 95% level	
Interaction		0.17	Not significant	
Other wastes except domestic wastewater		1.77	Significant at 99% level	
Sewer separation rate		0.009	Not significant	
Interaction	0.85	Not significant		



방류지역 III, IV에서 처리공법 요인효과의 절댓값 합은 3.29이며, 연계처리 유무 요인효과의 절댓값 합은 3.86, 분류식화율 요인효과의 절댓값 합은 1.10이다. 따라서, 방류지역 III, IV의 공공하수처리시설에서 방류수 TOC 농도에 유의미한 영향을 많이 미치는 요인은 연계처리 유무와 처리공법이며, 연계처리 유무가 미치는 영향이 조금 더 크다고 할 수 있다. 최근 전국적으로 하수관로 정비 사업을 수행한 지역이 많다고 해도, 유입수/침입수를 완벽하게 차단하기 어려울 뿐 아니라, 넓은 처리구역의 하수관망에서 발생할 수 있는 문제의 다양성 (Zhang et al., 2005)으로 인한 불확실성이 커서 분류식화율의 효과는 크게 나타날 수 없는 것으로 판단된다. 분류식화율이 연계처리 유무와 함께 고려될 경우에는 방류수 TOC 농도에 미치는 영향력이 매우 미미하였다.

3.2 TOC 처리부하량에 미치는 영향 요인 분석

공공하수처리시설의 설계 및 운영 요인과 TOC 처리부하량간의 상관관계를 2²요인배치법을 이용하여 분석하였다. 실험결과는 Table 13에 정리하였다. 앞의 경우와 마찬가지로 6회분의 데이터를 사용하였다. 하수처리시설의 규모가 작을수록 전문운영인력이 적어 처리가 잘 안 되는 경향이 있는데, 이런 영향을 제거하기 위해 Table 8과 같이 비슷한 처리용량을 가지는 처리시설을 선별하였다.

실험결과에 의하면 처리공법과 연계처리 유무의 교호작용, 연계처리 유무와 분류식화율의 교호작용은 95% 수준에서 TOC 처리부하량에 유의한 영향을 끼

치는 것으로 나타났다. 또한 처리공법과 분류식화율의 요인배치실험에서 처리공법과 교호작용은 유의하지 않았으며, 분류식화율이 95% 수준에서 유의한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

실험 결과를 종합하여 보면 2가지의 교호작용과 분류식화율 모두 총 변동에 대한 기여율이 낮고 상대적으로 오차항의 기여율보다 많이 낮기 때문에 TOC 처리부하량에 미치는 영향은 미미하다고 할 수 있다.

3.3 TOC 방류 부하량에 미치는 영향 요인 분석

공공하수처리시설의 설계 및 운영 요인과 TOC 방류 부하량간의 상관관계를 2²요인배치법을 이용하여 분석한 결과를 Table 14에 나타내었다

처리공법과 연계처리 유무의 주효과와 교호작용의 TOC 방류 부하량에 미치는 효과를 구해보니, 처리공법의 요인효과는 -23.11로써 연계처리 유무의 요인효과인 -26.50과 비슷하다. 교호작용의 요인효과는 39.21로써 오히려 각각의 처리공법과 연계처리 유무보다 큰 것으로 나타났다. 분산분석 결과 TOC 방류 부하량에 대한 처리공법과 연계처리 유무의 경우 F 검정 결과 처리공법, 연계처리 유무, 교호작용 모두 신뢰구간 99% 수준에서 유의하다. 추가로 순 변동(S')에 대한 처리공법의 기여율은 12.51%, 연계처리 유무는 16.88%, 교호작용은 38.60%이었고 오차항은 32.01%이었다.

또한, 처리공법과 분류식화율이 TOC 방류 부하량에 미치는 주효과와 교호작용의 효과를 구하였다. 처리공법의 요인효과는 -37.12로써 분류식화율의 요인효과인 -25.50보다 크다. 교호작용의 요인효과는 43.29로써

Table 13. Effects of factors affecting treated TOC loads and F-test results (Classification of effluent discharge regions were not considered)

Factors considered (Level 2)	Effects of factors	F-test results	Contribution to total change after pulling to error terms
Biological treatment method	178.99	Not significant	Interaction : 21% Error terms : 79%
Other wastes except domestic wastewater	-181.69	Not significant	
Interaction	-358.09	Significant at 95% level	
Biological treatment method	-138.03	Not significant	Sewer separation rate : 19% Error terms : 81%
Sewer separation rate	-435.44	Significant at 95% level	
Interaction	-215.71	Not significant	
Other wastes except domestic wastewater	72.27	Not significant	Interaction 19% Error terms : 81%
Sewer separation rate	-75.97	Not significant	
Interaction	-373.39	Significant at 95% level	

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 141-150

pp. 009-016

pp. 009-016

Table 14. Effects of factors affecting treated TOC loads and F-test results (Classification of effluent discharge regions were not considered)

Factors considered (Level 2)	Effects of factors	F-test results	Contribution to total change after pulling to error terms
Biological treatment method	-23.11	All three factors are significant at 99% level	13%
Other wastes except domestic wastewater	-26.50		17%
Interaction	39.21		Interaction : 38% Error terms : 32%
Biological treatment method	-37.12	All three factors are significant at 99% level	28%
Sewer separation rate	-25.50		13%
Interaction	-43.29		Interaction : 38% Error terms : 21%
Other wastes except domestic wastewater	33.07	Significant at 99% level	24%
Sewer separation rate	-16.54	Significant at 95% level	5%
Interaction	46.07	Significant at 99% level	Interaction : 47% Error terms : 25%

처리공법과 분류식화율 각각의 주효과보다 크다. TOC 방류 부하량에 대한 처리공법과 분류식화율의 경우 *F* 검정 결과 처리공법, 분류식화율, 교호작용 모두 신뢰구간 99% 수준에서 유의하다. 순 변동(*S'*)에 대한 처리공법의 기여율은 28.11%, 연계처리 유무의 기여율은 12.79%, 교호작용의 기여율은 38.55%, 오차항은 20.55%이다.

연계처리 유무와 분류식화율이 TOC 방류 부하량에 미치는 주효과와 교호작용의 효과를 살펴보니, 연계처리 유무의 요인효과는 -33.07로써 분류식화율의 요인효과인 -16.54보다 약 2배정도 크다. 교호작용의 요인효과는 46.07로써 연계처리 유무와 분류식화율보다 크다. 연계처리 유무와 분류식화율의 경우 *F* 검정 결과 연계처리 유무, 교호작용의 경우 신뢰구간 99% 수준에서 유의하며, 분류식화율의 경우 신뢰구간 95% 수준에서 유의하다. 순 변동(*S'*)에 대한 연계처리 유무의 기여율은 23.52%, 분류식화율의 기여율은 5.08%, 교호작용은 46.65%, 오차항은 24.76%로 나타났다.

3.4 분석결과의 시사점과 토론

생물학적 처리공법과 연계처리 유무, 분류식화율, 방류지역이 하수처리시설의 방류수 TOC, TOC 처리 부하량, TOC 방류부하량에 어느 정도의 영향을 주는 지 살펴보았다. 그리고 각각의 교호작용에 대해서도 알아보았다. 이러한 요인들이 방류수 TOC 농도와 TOC 처리부하량에 미치는 효과는 유의미하지 않게

나타나거나 매우 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다. 오히려 TOC 방류부하량에 영향을 주는 것으로 나타났다.

앞서 언급한 대로 하수관로 정비 사업을 통해 합류식 관로의 분류식화가 이루어진 곳이 있다 하더라도 오랜 기간 동안 사업이 이루어지면서 다시 노후화되기도 하며, 다양한 지점에서의 불명수량의 존재 가능성, 강우와 지하수 수위의 영향 등 매우 큰 불확실성으로 인해 분류식화율이 하수처리시설의 방류수 TOC에 영향을 주는 효과는 크지 않은 것으로 판단할 수 있다.

생물학적 처리공법을 크게 2분류할 때에는 통상 부유성장공정, 부착성장공정으로 구분하기도 하지만 (Metcalf and Eddy, 2003), 최근 하수고도처리가 보편화되면서 매우 다양한 공법이 개발되어 전국적으로 보급되어왔다. 이에 따라 처리공법을 크게 둘로 구분하여 방류수 TOC에 미치는 영향을 구하는 것이 그리 쉬운 일을 아닐 것이다. 하지만, 본 연구의 결과를 기반으로 앞으로 더 세부적인 공법별 특성을 고려한 방류수 TOC 영향에 대한 연구가 활발해지길 기대한다.

생활하수와 연계처리되는 축산폐수, 산업폐수, 침출수 등이 공공하수처리시설에 유입되는 TOC에 영향을 줄 것은 의심의 여지가 없다. 이 때, 생분해 가능한 유기물, 난분해성 유기물, 무기오염물질 등으로 TOC에 직접 또는 간접적으로 영향을 줄 수 있는 다양한 인자를 하수처리시설별로 더 상세하게 연구할 필요가 있을 것이다.



4. 결 론

방류수 TOC 농도에 끼치는 영향요인은 방류수지역 I, II에서는 유의한 영향요인이 없었고, 방류수지역 III, IV에서는 처리공법, 연계처리, 분류식화율 모두 유의한 영향요인으로 나타났다. TOC 처리부하량과 TOC 방류부하량에 미치는 영향 요인을 분석할 때에는 방류수지역 구분 없이 요인분석을 수행하였는데, TOC 처리부하량에 끼치는 유의미한 영향요인이 없었으나, TOC 방류부하량에 미치는 영향 요인으로 처리공법, 연계처리, 분류식화율 모두 유의한 것으로 나타났다.

TOC 방류부하량에 미치는 처리공법 요인효과의 절댓값의 합과 기여율의 합은 각각 60.23, 41%이고 연계처리 유무의 요인효과의 절댓값의 합과 기여율의 합은 각각 59.57, 41%이며 분류식화율 요인효과의 절댓값의 합과 기여율의 합은 각각 42.04, 18%이다. 따라서, 공공하수처리시설에서 TOC 방류부하량에 유의미한 영향을 미치는 요인은 처리공법, 연계처리 유무, 분류식화율의 순으로 나타났다. 특히, 처리공법과 연계처리 유무는 서로 큰 차이가 없는 영향을 미치며, 분류식화율의 경우는 연계처리 유무와 함께 고려될 경우 TOC 방류부하량에 미치는 영향력이 미미하다고 할 수 있다.

사 사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다. (NIER-2017-04-02-014)

References

Cheng, L., Zhang, T., Vo, H., Diaz, D., Quanrud, D., Arnold, R., and Saez, A.E. (2017). Effectiveness of engineered and natural wastewater treatment processes for the removal of trace organics in water reuse, *J. Environ. Eng.*, 143(7), 03117004-1-18.

Chevremont, A.C., Boudenne, J.L., Coulomb, B., and Farnet, A.M. (2013). Impact of watering with UV-LED-treated wastewater on microbial and physico-chemical parameters of soil, *Water Res.*, 47(6), 1971-1982.

Chevremont, A.C., Farnet, A.M., Sergent, M., Coulomb, B., and Boudenne, J.L. (2012). Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C

LEDs, *Desalination*, 285, 219-225.

Esparza-Soto M., Nunez-Hernandez, S., and Fall, C. (2011). Spectrometric characterization of effluent organic matter of a sequencing batch reactor operated at three sludge retention times, *Water Res.*, 45, 6555-6563.

Fatta-Kassinos, D., Meric, S. and Nikolaou, A. (2011). Pharmaceutical residues in environmental waters and wastewater: current state of knowledge and future research, *Anal. Bioanal. Chem.*, 399(1), 251-275.

Fatta-Kassinos, D., Vasquez, M.I., and Kümmerer, K. (2011). Transformation products of pharmaceuticals in surface waters and wastewater formed during photolysis and advanced oxidation processes-degradation, elucidation of byproducts and assessment of their biological potency, *Chemosphere*, 85(5), 693-709.

Jeong, D.H., Cho, Y.S., Ahn, K.H., Chung, H.M., Park, H.W., Shin, H.S., Hur, J., and Han, D.H. (2015). A Study on the determination method of TOC effluent limitation for public sewage treatment plants, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 30(3), 241-251.

Kim, D.S. and Park, Y.S. (2013). Optimization of gas mixing-circulation plasma process using design of experiments, *J. Environ. Sci.*, 23(3), 359-368.

Korea Environmental Institute(KEI). (2015). *A Study on the determination method of TOC effluent limitation in industrial wastewater.*

Metcalf and Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw Hill, 588-607.

Michael-Kordatou I., Michael, C., Duan, X., He, X., Dionysiou, D.D., Mills M.A., and Fatta-Kassinos, D. (2015). Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications, *Water Res.*, 77, 213-248.

National Institute of Environmental Research(NIER). (2011). *A study on policy direction and management of organic substance indicator transfer for environmental criteria in public watershed.*

National Institute of Environmental Research(NIER). (2014). *A study on determining TOC standard for application of sewage treatment plant effluent (I).*

National Institute of Environmental Research(NIER). (2015). *A study on determining TOC standard for application of sewage treatment plant effluent (II).*

Park, J.S. and Chang, S.W. (2007). Optimization study of trace analysis of potential diesel oxygenate using the design of experiment (DOE) in solid-phase microextraction with GC/FID, *J. Soil Groundw. Environ.*, 12(5), 73-85.

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 141-150

pp. 009-016

pp. 009-016

- Park, S.H, and Kim, J.O. (2013). *Modern design experiments using minitab*, Minyeongsa.
- Rodríguez-Chueca, J., Polo-López, M.I., Mosteo, R., Ormad, M.P., and Fernández-Ibáñez, P. (2014). Disinfection of real and simulated urban wastewater effluents using a mild solar photo-Fenton, *Appl. Catal. B: Environ.*, 150, 619-629.
- The White House. (2015). *National Strategy for Combating Antibiotic-resistant Bacteria*. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/docs/carb_national_strategy.pdf.
- Tran, N.H., Ngo, H.H., Urase, T., and Gin, K.Y-H. (2015). A critical review on characterization strategies of organic matter for wastewater and water treatment processes, *Bioresour. Technol.*, 193, 523-533.
- Yu, H., Qu, F., Sun, L., Liang, H., Han, Z., Chang, H. and Li, G. (2015). Relationship between soluble microbial products (SMP) and effluent organic matter (EfOM): characterized by fluorescence excitation emission matrix coupled with parallel factor analysis, *Chemosphere*, 121, 101-109.
- Zhang, Z. (2005). Flow data, inflow/infiltration ratio and autoregressive error models, *J. Environ. Eng.*, 131(3), 343-349.