

## 하수처리시설 총 유기탄소 분포 및 유기물질간 상관관계 분석

조영범 · 오용걸 · 신동철 · 박철휘<sup>†</sup>

서울시립대학교 환경공학과

### Distribution of Total Organic Carbon and Correlations between Organic Matters of Sewage Treatment Plants

Young-Beom Cho, Yong-keol Oh, Dong-Chul Shin, and Chul-Hwi Park<sup>†</sup>

*Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea*

Received September 25, 2014/Revised October 13, 2014/Accepted October 21, 2014

This study was conducted to compare the behavior of total organic carbon among biological sewage treatment processes and analyze correlations between organic matters in the influent and effluent of sewage treatment plants (STP). Target STPs selected for this study were four plants where representative processes were applied according to the processing system. The treatment processes used in these plants included 4-stage biological nutrient removal (4-stage BNR), bio ceramic sequencing batch reactor (BCS), denitrification and phosphorus removal (DeNiPho), and membrane bio-reactor (MBR). The TOC removal rates of the four plants averaged 86.9%, lower than their COD and BOD removal efficiencies, but the TOC concentrations in their effluent were steady (no higher than 10 mg/L). In the simple correlation analysis, TOC showed the highest correlations with SBOD<sub>5</sub>( $r=0.989$ ) and TCOD<sub>Mn</sub>( $r=0.971$ ) in the influent and with SCOD<sub>Mn</sub>( $r=0.996$ ) in the effluent, which indicates that TOC can replace COD as an organic indicator. According to the principal component analysis (PCA), three components were extracted from PCA A between organic matters in the influent and effluent. For the influent, the analysis result showed that the first component had high positive correlations with TOC, DOC, TCOD<sub>Cp</sub>, SCOD<sub>Cp</sub>, TBOD<sub>5</sub>, and SBOD<sub>5</sub>. Its variance was 59.1% among all principal components (PCs). The PCA of the effluent suggested that PC 1, PC 2 and PC 3 accounted for 44%, 35% and 21% of the total variances, respectively. The first component had high positive correlations with POC, TSS, VSS, T-N, and sT-N.

**Key words:** Total organic carbon, Organic matters, Sewage effluent, Pearson correlation analysis, Principal component analysis

### 1. 서 론

국내에서는 공공하수처리시설 방류수의 유기물질 관리지표로 생물화학적 산소요구량(BOD)과 화학적 산소요구량(COD)을 사용하고 있다. BOD는 유기물질 중 생분해성 유기물질을 측정하는 방법으로 분석에 많은 시간이 소요되며, 낮은 분해율로 시료 중 유기물질의 총량을 정확하게 정량하기 어렵다는 단점을 가진다. COD의 경우 BOD에 비해 상대적으로 정확한 유기물

질 지표가 될 수 있으나 시료의 성상에 따른 산화율의 차이가 크고, 재현성이 낮아 대표지표로서의 한계를 지적 받아 왔다.<sup>1-4)</sup> 또한 그 동안 BOD 중심의 유기물질 관리를 통해 공공수역 및 하수처리시설의 BOD 오염도는 지속적으로 감소하고 있으나, 수계 내 난분해성 유기물질의 증가로 COD는 점차 증가하는 추세에 있어 BOD와 COD 중심의 유기물질 관리의 한계점을 보완하기 위한 다양한 연구가 수행되었다.<sup>4,6)</sup> 총 유기탄소(TOC)는 직접적으로 탄소량을 측정하는 방식으로 수체

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

내 유기물질의 양을 정확하게 정량할 수 있어 측정오차를 줄일 수 있고, 난분해성 유기물질의 측정이 가능하고 소량의 시료로 자동측정이 가능하다는 장점을 가진다. 이에 유기물질을 체계적으로 관리하기 위해 2013년 1월 1일부터 국내 하천과 호소의 생활환경 기준에 TOC 항목이 적용되어 유기물질 지표로 활용되고 있으며, 2016년부터 TOC가 COD를 대체하게 된다.<sup>7)</sup>

하천과 호소의 생활환경 기준에 TOC가 도입됨에 따라 수역에 직접적으로 영향을 미치는 공공하수처리시설 방류수의 TOC 농도가 중요<sup>8)</sup>하게 되었고, 방류수 수질기준에 TOC 항목이 신설될 예정이다. 따라서 현재 BOD를 기반으로 운영중인 BNR(Biological Nutrient Removal) 공정에서 공법에 따른 TOC의 거동을 파악하는 연구가 필요하며, 기준에 축적된 COD, BOD 값과 TOC 값을 연계하여 기존 자료의 활용방안을 모색할 필요가 있다.

본 연구에서는 (1) 운영중인 하수처리시설 공법에 따라 TOC 및 유기물질의 거동과 특징을 파악하고, (2) 기존 유기물질 자료의 활용방안을 모색하기 위하여 통계적 분석법을 이용하여 유입하수와 방류수의 TOC와 기존 유기물질 지표인 BOD, COD와의 상관관계를 파악하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 공공하수처리시설 및 채수지점

본 연구에서 지역 구분상 한강 및 임진강권역에 위치하고, III 지역으로 방류수 수질 기준이 동일한 공공하수처리시설을 대상으로 하수처리 계열에 따른 대표 공정을 적용한 시설을 선택하였다. 선택된 시설은 총 4개소이며, 하수처리장 내 공정에 따른 거동을 파악하기

위해 단위공정 별로 채취하였다. 각 시설의 특징과 채수지점에 대해 Table 1에 나타내었다. 시료는 2014년 4~6월에 걸쳐 총 3회 채취하였으며, 선행강우가 없는 시점에 실시하였다. 시료는 무균채수병에 채취하여 즉시 냉장보관하여 운반하였으며, 실험실에 도착 즉시 분석을 실시하였다.

### 2.2. 분석방법

채취한 시료는 TOC, DOC, POC, (s)COD<sub>Cr</sub>, (s)COD<sub>Mn</sub>, (s)BOD<sub>5</sub>, TSS, VSS, T-N, T-P의 항목을 측정하였다. BOD, COD<sub>Mn</sub>, SS, T-N, T-P 분석은 수질오염공정시험방법을 기준으로 분석을 실시하였고, COD<sub>Cr</sub>은 Standard Method 5220B(K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Closed Reflux Method)를 바탕으로 분석하였다. 총 유기탄소는 TOC 분석장치인 TOC-V<sub>CHP</sub>(Shimadzu, Japan)을 이용하여 non-purgeable organic carbon(NPOC)법으로 분석하였다. 분석 시 유입하수의 조대한 입자성 물질은 기기에 영향을 미치지 않을 200 µm 체 거름을 실시한 후 분석간 지속적인 교반을 실시하여 입자의 침전을 방지하였다. BOD 측정 시 NBOD를 방지하기 위하여 질산화 억제시약인 ATU (Alfa Aesar, 98%)를 주입하였다. 각 용존성 유기물질은 GF/C filter (Whatman, 1.2 µm)를 이용하여 원수를 여과 후 얻어진 시료를 이용하여 동일한 방법으로 분석하였다. 입자성 유기탄소(POC)는 총 유기탄소에서 용존성 유기탄소 농도를 제하여 산정하였다.

### 2.3. 유기물질의 상관관계 분석 및 주성분분석

상관관계 분석(Correlation Analysis)은 변수들 간의 관련성을 해석하기 위한 방법으로 이를 통해 변수들 사이의 관련성의 여부와 정도를 파악할 수 있다. 상관관

Table 1. Selected sewage treatment plants and sampling points

	Process (System)	Capacity (m <sup>3</sup> /d)	Sampling Points
A Plant	4-stage BNR (A2O) <sup>1)</sup>	14,000	Influent, equalization tank, secondary effluent, tertiary effluent
B Plant	BCS (SBR) <sup>2)</sup>	2,000	Influent, equalization tank, secondary effluent, tertiary effluent
C Plant	DeNiPho (Carrier) <sup>3)</sup>	15,000	Influent, equalization tank, primary effluent secondary effluent, tertiary effluent
D Plant	MBR (Membrane) <sup>4)</sup>	4,100	Influent, equalization tank, secondary effluent, tertiary effluent

<sup>1)</sup>4-stage Biological Nutrient Removal (Anaerobic-Anoxic-Aerobic process)

<sup>2)</sup>Bio Ceramic SBR (Sequencing Batch Reactor)

<sup>3)</sup>Denitrification and Phosphorus removal (Carrier)

<sup>4)</sup>Membrane Bioreactor (Membrane)

계 분석에서 변수간의 관련성을 구하기 위해 보편적으로 피어슨 상관계수가 이용된다. 변수가 완전히 동일하면 +1.0, 전혀 다르면 0을 나타내며, -1.0에서 +1.0의 범위를 보인다. 양의 상관관계를 보일 시 (+)값, 음의 상관관계를 의미할 때 (-)값을 나타낸다.<sup>9)</sup> 본 연구에서는 이러한 피어슨 상관계수를 이용하여 측정된 유입원수와 방류수의 유기물질 농도간의 상관관계를 분석하였다.

주성분분석(Principal component analysis: PCA)은 다변량 분석기법의 하나로써, 다변량의 데이터로부터 본질이 되는 소수의 특징적인 변량을 합성하여 그것으로 데이터를 분석하는 방법이다. 주성분 분석의 목적은 서로 상관성을 가진 변수들을 큰 손실 없이 그룹화하여 차원을 축소하고, 주성분에 포함되지 않거나 중요도가 낮은 변수들을 제외시키고, 변수들간의 특성을 파악

하는 것이다. 본 연구에서는 각 요인은 일부의 변량에 대해 높은 상관성을 나타내고, 다른 변량과는 낮은 상관성을 나타낸다는 원리를 이용한 베리맥스법(Varimax method)를 이용하여 주성분분석 결과를 조정하였다.<sup>10)</sup> <sup>11)</sup> 상관관계와 주성분분석은 IBM SPSS Statistics 21 프로그램을 이용하여 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 생물학적 처리공법별 유기물질의 농도

본 연구에서 대상으로 한 4개 공공하수처리시설에서 검출된 유기물질 농도를 Table 2에 나타내었다. 유입원수의 TOC, TCOD<sub>Cr</sub>, TCOD<sub>Mn</sub>, TBOD<sub>5</sub>의 평균 농도는 각각 53.7, 424.8, 126.2, 94.6 mg/L이며 방류수의 평균 농도는 각각 7.1, 26.6, 10.9, 7.9 mg/L로 나타났

**Table 2.** Concentrations of organic matters in sewage treatment plants

Parameters	A plant		B plant		C plant		D plant	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
TOC (mg/L)	64.7±21.6 <sup>1)</sup> (42.5~94.0) <sup>2)</sup>	7.5±0.9 (6.4~8.6)	56.7±10.8 (46.0~71.4)	8.6±1.8 (6.6~11.1)	40.5±3.3 (37.1~43.8)	6.7±0.7 (6.0~7.3)	52.9±24.4 (29.5~86.6)	5.4±1.6 (3.6~7.4)
DOC (mg/L)	47.9±14.1 (31.9~66.2)	6.0±1.2 (4.6~7.4)	40.8±10.8 (32.0~56.0)	7.4±1.7 (5.8~9.8)	25.2±0.4 (24.9~25.6)	4.0±0.2 (4.2~3.8)	32.1±19.4 (14.4~59.1)	4.1±1.3 (3.1~6.0)
POC (mg/L)	16.8±7.8 (10.6~27.8)	1.5±0.3 (1.2~1.8)	15.9±1.8 (13.9~18.3)	1.2±0.2 (0.9~1.4)	15.2±3.0 (12.2~18.2)	2.6±0.9 (1.8~3.5)	20.7±5.1 (15.1~27.5)	1.3±0.7 (0.3~2.1)
TCOD <sub>Cr</sub> (mg/L)	492.9±26.5 (455.5~514.3)	24.2±5.2 (13.8~31.0)	490.2±40.1 (446.0~543.1)	31.3±3.9 (27.2~36.5)	351.7±65.9 (285.7~417.6)	29.0±1.2 (27.8~30.2)	364.4±51.8 (307.2~353.4)	22.1±7.7 (12.3~31.0)
SCOD <sub>Cr</sub> (mg/L)	178.1±17.6 (155.1~197.8)	16.8±7.4 (9.6~14.4)	133.5±39.1 (86.7~182.4)	25.4±5.8 (18.4~32.6)	191.4±42.8 (148.6~234.2)	21.1±3.9 (17.1~25.0)	136.6±21.5 (106.9~157.0)	17.4±5.9 (9.0~21.1)
TCOD <sub>Mn</sub> (mg/L)	175.6±17.6 (151.3~192.2)	10.5±2.9 (5.5~9.5)	142.0±37.4 (97.6~189.2)	12.2±2.8 (8.7~15.5)	95.5±3.4 (92.2~98.9)	10.6±3.0 (7.7~13.6)	91.7±7.2 (81.5~97.6)	10.3±3.8 (6.6~15.5)
SCOD <sub>Mn</sub> (mg/L)	99.7±27.4 (63.6~192.2)	8.7±2.1 (7.2~11.6)	70.5±36.9 (30.7~119.7)	9.6±1.7 (7.6~11.8)	25.8±0.2 (25.6~26.0)	7.8±0.6 (7.2~8.3)	40.9±6.9 (32.6~49.4)	6.3±1.6 (4.1~7.4)
TBOD <sub>5</sub> (mg/L)	122.1±14.7 (110.3~142.8)	10.6±11.2 (0.2~26.1)	84.0±6.2 (75.3~88.4)	11.3±11.6 (3.0~27.6)	89.7±2.4 (87.3~92.0)	5.7±0.4 (5.3~6.1)	82.8±8.7 (70.8~91.3)	3.8±1.2 (2.2~5.0)
SBOD <sub>5</sub> (mg/L)	48.9±3.8 (45.5~54.1)	2.8±1.9 (0.1~4.4)	42.9±3.4 (38.2~46.2)	2.7±1.8 (0.8~5.1)	31.3±3.9 (27.4~35.1)	2.3±2.1 (0.3~4.4)	48.0±8.0 (40.5~59.1)	2.3±1.5 (0.3~3.8)
TSS (mg/L)	242.2±105.1 (167.0~390.8)	4.4±1.5 (1.3~4.4)	199.2±35.1 (147.0~187.9)	3.7±0.8 (2.8~4.8)	128.5±6.5 (122.0~135.0)	7.5±2.0 (5.5~9.6)	132.0±29.5 (105.0~173.0)	9.5±2.4 (6.1~11.7)
VSS (mg/L)	199.2±53.0 (149.0~272.5)	2.9±0.7 (0.8~2.3)	124.3±50.3 (60.9~184.0)	2.5±0.9 (1.3~3.3)	111.0±5.0 (106.0~116.0)	5.2±2.2 (3.0~7.4)	112.3±28.5 (86.0~152.0)	4.1±1.3 (2.4~5.5)
T-N (mg/L)	50.0±5.6 (42.2~55.3)	18.8±4.3 (13.4~23.9)	41.4±10.3 (27.4~51.8)	5.2±3.1 (2.6~9.6)	49.3±4.2 (45.1~53.5)	18.6±7.5 (19.6~34.5)	39.0±7.3 (31.7~49.0)	6.2±2.4 (3.9~9.5)
sT-N (mg/L)	39.4±13.4 (20.4~49.1)	10.7±4.7 (4.9~16.5)	23.9±1.8 (21.6~26.0)	4.7±2.9 (2.6~8.)	29.8±4.2 (25.6~34.0)	12.2±4.1 (11.1~19.3)	30.0±15.9 (15.9~52.2)	5.4±2.6 (3.3~9.0)
T-P (mg/L)	4.1±1.6 (2.8~6.4)	0.2±0.1 (0.1~0.3)	4.0±1.1 (2.7~5.3)	0.3±0.1 (0.2~0.5)	3.8±0.4 (3.4~4.3)	0.2±0.1 (0.1~0.2)	3.1±0.1 (2.9~3.3)	0.5±0.3 (0.1~0.7)
sT-P (mg/L)	2.0±0.7 (1.1~2.9)	0.1±0.1 (0.0~0.2)	2.3±0.6 (1.5~2.9)	0.3±0.0 (0.2~0.3)	2.4±0.4 (2.1~2.8)	0.0±0.0 (0.0~0.0)	1.7±0.3 (1.4~2.1)	0.1±0.1 (0.1~0.2)

<sup>1)</sup>Mean±Standard Deviation, <sup>2)</sup>Minimum~Maximum concentration

다. 각 유기물질의 제거효율을 보면  $TCOD_{Cr}$ 이 93.7%로 가장 높은 제거효율을 보였으며,  $BOD_5$ 와  $TCOD_{Mn}$ 이 각각 91.7, 91.4%가 제거되었다. TOC의 경우 평균 86.9%의 제거효율을 보였으며 이는 운영중인 공공하수처리시설이  $TBOD_5$ 와  $TCOD_{Mn}$ 을 기준으로 운전되고 있음에도 불구하고 TOC 역시 대부분 제거가 가능한 것으로 사료된다.

유입하수의 TOC 농도 변화(29.5~94.0 mg/L)가 큰 반면, 방류수 내 농도는 3.6~11.1 mg/L이며 대부분 10 mg/L 이하로 안정적으로 처리된다. 이는 TOC가 다른 유기물질과 마찬가지로 하수처리시설에 유입되는 농도는 수시로 변화하지만 그와 관계없이 방류수는 일정한 농도를 유지하는 것으로 나타났다.<sup>12)</sup>

처리공법에 따른 TOC의 거동을 비교하면, BCS공정(SBR 계열)으로 운영중인 B 공공하수처리시설의 경우 TOC와 DOC의 제거효율이 각각 84.8, 81.8%로 나머지 처리장에 비해 낮은 수치를 나타냈으며, 방류수 내 TOC의 농도가 6.6~11.1 mg/L로 변동폭이 가장 컸다. 반면 MBR공정으로 운영중인 D 공공하수처리시설의 경우 90.0, 87.1%의 TOC와 DOC를 제거하며, 방류수 내

TOC가 3.6~5.4 mg/L로 낮고 변동폭 또한 작았다. 이는 기존의 다른 유기물질도 비슷한 경향을 보이며 공정의 효율에 따라 TOC의 제거율도 변화하는 것으로 나타났다(Fig. 1).

### 3.2. 하수처리시설 유기탄소 분포 및 용존성 비율 비교

하수처리장 유입원수와 방류수의 유기탄소 분포를 Fig. 2에 나타내었다. 유입원수의 DOC/TOC는 0.67 (0.49~0.79), POC/TOC는 0.30 (0.21~0.51), DOC/POC는 2.36 (1.17~3.63)의 값을 나타내었다. 이는 하수원수에서 용존성 유기물질의 농도가 총 유기탄소 농도에 더 많은 기여를 함을 의미한다. 방류수 내 DOC/TOC는 0.76 (0.52~0.90), POC/TOC는 0.21 (0.09~0.48), DOC/POC는 3.93 (1.01~10.1)의 범위로 유기물질 농도는 입자성에 비해 용존성의 비율이 높게 나타났다. 총 유기탄소 내 용존성 유기탄소 비율이 유입원수에 비해 약 1.5배 증가하였다. 방류수 내  $SCOD_{Cr}/TCOD_{Cr}$ ,  $SCOD_{Mn}/TCOD_{Mn}$ 의 값은 각각 0.75 (0.52~0.92), 0.77 (0.48~1.54)의 범위로 DOC/TOC와

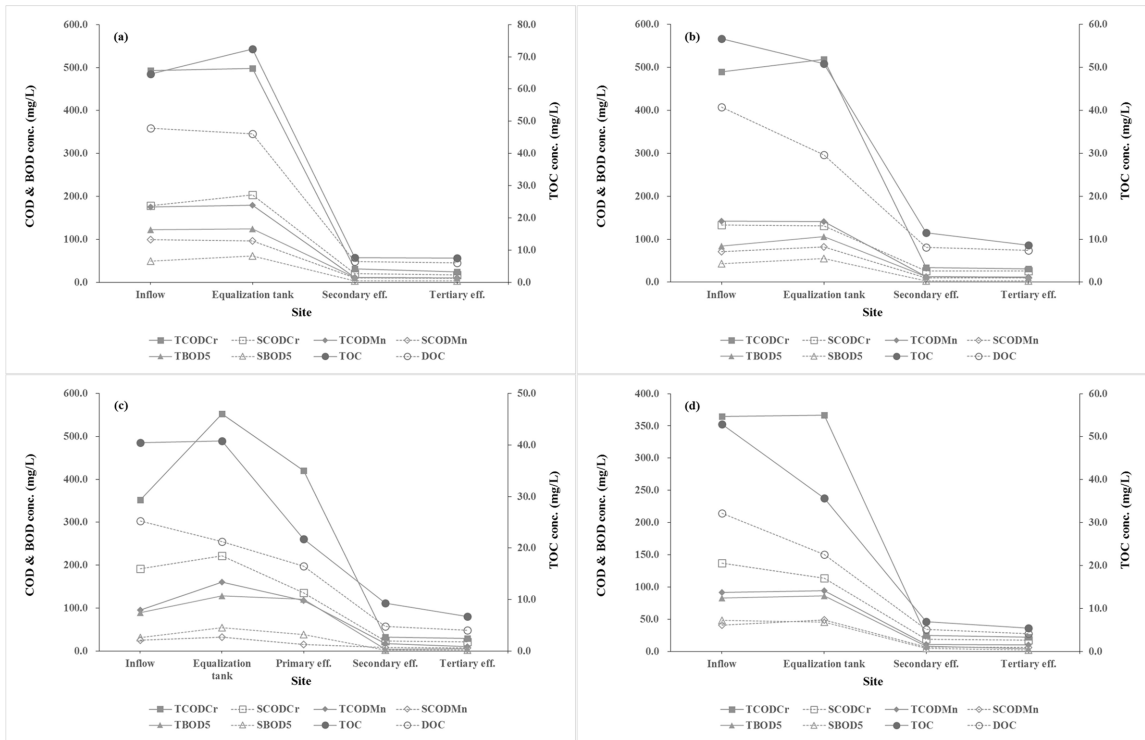


Fig. 1. Distribution of organic matters for each biological process of sewage treatment plants: (a) 4-stage BNR, (b) BSC (c) DeNiPho, and (d) MBR.

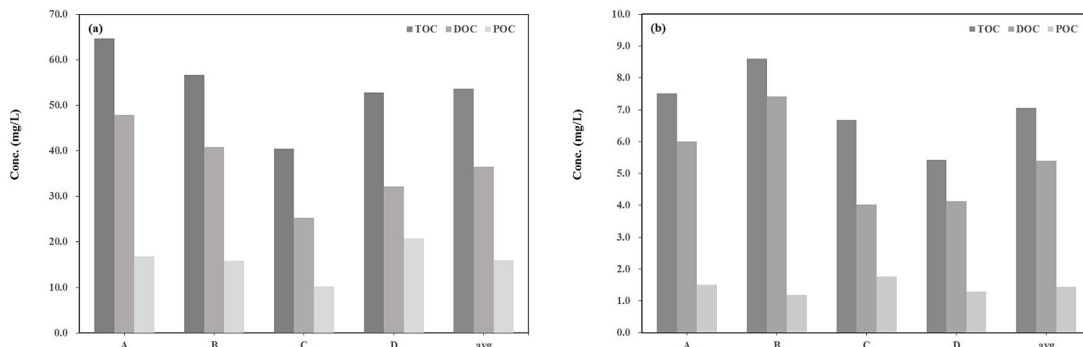


Fig. 2. The concentrations of TOC, DOC, and POC in the (a) influent and (b) effluent of sewage treatment plants.

비슷한 정도였으나 DOC/TOC 비헤 변동폭은 더 큰 것으로 나타나 COD는 TOC와 비교하여 방류수 내 유기물질의 특성에 따라 산화율의 차이가 발생하는 것으로 보인다.<sup>13)</sup>

### 3.3. 하수처리시설 유기물질 지표간 산화율 비교

공공하수처리시설 유기물질 지표간 산화율을 비교한 결과를 Table 3에 나타내었다. 유입원수 내  $TCOD_{Cr}/TOC$ ,  $TCOD_{Mn}/TOC$ ,  $TBOD_5/TOC$ 의 비율은 각각 8.56 (3.72~11.97), 2.53 (0.94~2.10), 1.94 (1.00~3.10)을 나타내었다. 방류수 내  $TCOD_{Cr}/TOC$ ,  $TCOD_{Mn}/TOC$ ,  $TBOD_5/TOC$ 의 비율은 4.13 (1.658~9.53), 1.70 (0.99~4.26), 1.01(0.03~3.04)로 유입원수 대비 세가지 항목 모두 크게 감소하였다.

BOD와 COD의 산화율을 TOC 산화율과 비교하기 위해 두 항목의 산소요구량을 탄소량으로 환산하였다. BOD와 COD는 유기물질이 산화될 때 필요한 산소의 양을 측정한 간접적인 값으로, 두 항목의 결과 값을 화

학양론비 ( $C/O_2=12/32$ )를 이용하여 탄소량을 환산한 뒤 TOC와 비를 구하였다.<sup>14)</sup> C-COD/TOC, C-BOD/TOD의 값은 Table 4에 표시하였다. 일부 탄소 농도로 전환된 산화율이 100%를 초과하는 경우가 있었는데, 이는 유기물질이 산화할 때 단순한 화학양론식으로부터 구해진 산소요구량 보다 더 많은 산소가 소모될 수 있음을 보여준다.

### 3.4. 유기물질 항목간 상관관계 분석

유입원수와 방류수 내 유기물질간의 단순 상관관계 분석하기 위해 SPSS 프로그램을 이용하여 Pearson correlation analysis를 실시하였으며 그 결과를 Table 5, 6에 나타내었다. 유입수의 유기물질간 상관관계 분석 결과 TOC는 유의수준 0.05에서  $SBOD_5$  ( $r=0.989$ )와  $TCOD_{Mn}$  ( $r=0.971$ )과 가장 높은 상관관계를 나타내었고  $TCOD_{Cr}$ ,  $TBOD_5$ , TSS와 높은 상관성을 보인다. DOC는  $SBOD_5$  ( $r=0.995$ ,  $p<0.01$ )와 가장 큰 상관성을 띄며, POC는 유입하수 내 TSS 농도에 많은 영향을

Table 3. Ratios of organic matters in the influent and effluent of sewage treatment plants

Para-meters	$COD_{Cr}/TOC$		$COD_{Mn}/TOC$		$BOD_5/TOC$		$COD_{Cr}/BOD_5$		$COD_{Mn}/BOD_5$		$COD_{Cr}/COD_{Mn}$	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
A	8.58	3.35	3.11	1.45	2.09	1.31	4.08	2.42	1.45	1.25	2.82	2.38
B	8.81	3.89	2.47	1.45	1.52	1.12	5.84	7.51	1.67	2.73	3.63	2.77
C	8.61	4.40	2.38	1.65	2.24	0.87	3.94	5.10	1.07	1.83	1.12	2.83
D	8.23	4.87	2.17	2.24	1.92	0.75	4.52	6.76	1.12	2.83	4.00	2.29
Avg.	8.56	4.13	2.53	1.70	1.94	1.01	4.60	5.45	1.33	2.16	3.54	2.59

Table 4. Ratios of C-COD/TOC and C-BOD in the influent and effluent of sewage treatment plants

	C-COD <sub>Mn</sub> (mg C/L)	C-BOD <sub>5</sub> (mg C/L)	C-COD <sub>Mn</sub> /TOC (%)	C-BOD <sub>5</sub> /TOC (%)
Influent	48.4 (30.6~72.0)	35.6 (26.55~53.5)	67.7 (56.9~134.3)	50.7 (49.5~99.7)
Effluent	4.1 (2.5~5.8)	3.0 (0.1~10.4)	58.2 (35.1~82.5)	42.8 (1.2~138.9)

**Table 5.** Correlation coefficients between organic matters in the influent of sewage treatment plants

	TOC	DOC	POC	TCOD <sub>Cr</sub>	SCOD <sub>Cr</sub>	TCOD <sub>Mn</sub>	SCOD <sub>Mn</sub>	TBOD <sub>5</sub>	SBOD <sub>5</sub>	TSS	VSS	T-N	sT-N	T-P	sT-P
TOC	1	0.97*	0.62	0.84	0.31	0.97*	0.93	0.84	0.99*	0.78	0.75	-0.14	0.45	0.30	-0.48
DOC		1	0.42	0.93	-0.19	0.89	0.83	0.93	0.99**	0.61	0.61	-0.19	0.44	0.52	-0.25
POC			1	0.19	-0.72	0.76	0.77	0.12	0.50	0.94	0.73	-0.08	0.12	-0.56	-0.91
TCOD <sub>Cr</sub>				1	-0.21	0.69	0.58	0.88	0.90	0.34	0.29	-0.46	0.17	0.68	0.07
SCOD <sub>Cr</sub>					1	-0.34	-0.27	0.17	-0.22	-0.48	-0.09	0.70	0.58	0.49	0.42
TCOD <sub>Mn</sub>						1	0.99*	0.74	0.93	0.91	0.87	0.01	0.52	0.09	-0.67
SCOD <sub>Mn</sub>							1	0.70	0.88	0.93	0.94	0.15	0.61	0.02	-0.74
TBOD <sub>5</sub>								1	0.91	0.39	0.52	0.01	0.60	0.73	-0.04
SBOD <sub>5</sub>									1	0.69	0.68	-0.15	0.47	0.44	-0.35
TSS										1	0.92	0.13	0.43	-0.33	-0.92
VSS											1	0.47	0.76	-0.16	-0.85
T-N												1	0.80	-0.14	-0.33
sT-N													1	0.25	-0.39
T-P														1	0.64
sT-P															1

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ ,  $p$ : significance level**Table 6.** Correlation coefficients between organic matters in the effluent of sewage treatment plants

	TOC	DOC	POC	TCOD <sub>Cr</sub>	SCOD <sub>Cr</sub>	TCOD <sub>Mn</sub>	SCOD <sub>Mn</sub>	TBOD <sub>5</sub>	SBOD <sub>5</sub>	TSS	VSS	T-N	sT-N	T-P	sT-P
TOC	1	0.92	-0.26	0.43	0.67	0.84	0.99**	0.85	0.45	0.09	0.19	-0.09	-0.15	-0.41	0.34
DOC		1	-0.60	0.31	0.56	0.87	0.89	0.77	0.48	-0.32	-0.23	-0.45	-0.54	-0.03	0.66
POC			1	-0.24	-0.30	-0.27	-0.19	-0.12	0.04	0.88	0.85	0.98*	0.97*	-0.53	-0.74
TCOD <sub>Cr</sub>				1	0.96*	-0.11	0.37	-0.10	-0.62	0.20	0.24	-0.23	-0.00	-0.65	-0.34
SCOD <sub>Cr</sub>					1	0.19	0.63	0.19	-0.36	0.18	0.24	-0.23	-0.07	-0.65	-0.16
TCOD <sub>Mn</sub>						1	0.86	0.96*	0.24	-0.15	-0.07	-0.10	-0.31	0.047	0.67
SCOD <sub>Mn</sub>							1	0.89	0.50	0.14	0.23	-0.02	-0.10	-0.42	0.32
TBOD <sub>5</sub>								1	0.84	0.12	0.20	0.17	-0.03	-0.18	0.46
SBOD <sub>5</sub>									1	-0.10	-0.06	0.17	-0.11	0.28	0.62
TSS										1	0.99**	0.91	0.96*	-0.86	-0.82
VSS											1	0.89	0.94	-0.89	-0.78
T-N												1	0.96*	-0.58	-0.67
sT-N													1	-0.71	-0.85
T-P														1	0.72
sT-P															1

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ ,  $p$ : significance level

받는다. 방류수 내 유기물질 간 상관관계 분석 결과, 유입원수의 상관관계 분석결과와는 다소 차이가 있지만 대부분 유사한 관계성을 나타내었다. TOC는 SCOD<sub>Mn</sub> ( $r=0.996$ ,  $P<0.01$ )과 가장 높은 상관관계를 나타내며 TBOD<sub>5</sub>, TCOD<sub>Mn</sub>과 높은 양의 상관성을 나타낸다. DOC 역시 SCOD<sub>Mn</sub>과 양의 상관관계를 나타내며 대부분의 유기물질이 양의 상관성을 나타내고 있다. 유입원수와 방류수의 유기물질 상관관계 분석 결과 TOC와 COD<sub>Mn</sub>이 좋은 양의 상관성을 나타내어 향후 공공하수처리시설의 방류수 수질 기준에 유기물질 지표로 COD<sub>Mn</sub>을 TOC로 전환하는 것이 가능함을 보여준다.

### 3.5. 유기물질 항목간 주성분분석 결과

유입원수와 방류수의 수질항목별 주성분분석을 실시한 결과를 Table 7에 나타내었다. 본 연구에서는 요인수를 결정하는 여러 방법 중에서 고유값(eigenvalue)을 기준으로 판단하였으며 고유값 1.0을 기준으로 하여 새로운 요인의 수를 추출하였다. 그 결과 유입원수와 방류수의 주성분분석에 의해 산출한 고유값이 1 이상인 값 중에서 3가지 성분이 추출되었다.

유입원수 성분 분석에서 요인 1의 고유값은 8.86으로 기여율은 59.1%, 요인 2는 고유값이 3.98으로 기여율은 26.5%, 요인 3은 고유값이 2.16으로 기여율은

**Table 7.** Initial eigenvalues and cumulative percentage of factors

Component	Influent			Effluent		
	Eigenvalues	% of variance	Cumulative %	Eigenvalues	% of variance	Cumulative %
1	8.864	59.096	59.096	6.632	44.214	44.214
2	3.977	26.513	85.610	5.246	34.976	79.190
3	2.159	14.390	100.000	3.121	20.810	100.000

**Table 8.** Rotated factor matrix extracted using varimax rotation by factor analysis

Variable	Influent			Effluent		
	1	2	3	1	2	3
TOC	0.778	0.629	-0.013	-0.002	0.900	0.436
DOC	0.907	0.420	-0.029	-0.399	0.855	0.330
POC	-0.003	0.988	-0.151	0.952	-0.154	-0.265
TCOD <sub>Cr</sub>	0.951	0.153	-0.269	0.021	-0.009	1.000
SCOD <sub>Cr</sub>	0.889	-0.167	0.426	-0.003	0.285	0.959
TCOD <sub>Mn</sub>	0.620	0.780	0.086	-0.156	0.983	-0.098
SCOD <sub>Mn</sub>	0.545	0.810	0.218	0.055	0.924	0.378
TBOD <sub>5</sub>	0.965	0.154	0.212	0.122	0.988	-0.092
SBOD <sub>5</sub>	0.862	0.508	0.001	-0.004	0.791	-0.611
TSS	0.229	0.967	0.111	0.983	0.019	0.181
VSS	0.306	0.818	0.486	0.969	0.101	0.224
T-N	-0.216	0.073	0.974	0.968	0.028	-0.249
sT-N	0.390	0.254	0.885	0.987	-0.156	-0.025
T-P	0.830	-0.552	0.080	-0.755	-0.145	-0.639
sT-P	0.159	-0.959	-0.235	-0.786	0.528	-0.323

14.4%을 나타내었다. 고유값이 1 이상인 3개의 요인 누적기여율은 100%이다. 방류수 성분 분석에서 요인 1의 고유값은 6.63으로 기여율은 44.2%, 요인 2는 고유값이 5.25으로 기여율은 35.0%, 요인 3의 고유값이 3.12으로 기여율은 20.8%을 나타내었고, 고유값이 1 이상인 3개의 요인 누적기여율은 100%이다.

Table 8은 주성분분석을 통해 얻어진 인자부하량을 분석한 결과이며 Fig. 3는 varimax 회전 후 요인 1, 2, 3을 기준으로 산포도를 작성한 결과이다. 주성분분석 결과 유입원수 분석에서 제1요인은 TOC, DOC, TCOD<sub>Cr</sub>, SCOD<sub>Cr</sub>, TBOD<sub>5</sub>, SBOD<sub>5</sub>, T-P와 높은 양의 인자부하량을 가지고 있고, 제2요인은 POC, TCOD<sub>Mn</sub>, SCOD<sub>Mn</sub>, TSS, VSS와 높은 양의 인자부하량을 가지고 있다. 요인 1의 TOC와 COD<sub>Cr</sub>은 하수의 총 유기물질의 농도를 나타내는 지표이며 BOD<sub>5</sub>는 생분해성 유기물질을 나타내는 지표로 판단되며 유입하수의 생분해도를 나타내는 성분이라고 정의할 수 있다. 요인 2는 유입하수의 입자성 성분에 의한 유기물질 농도를 나타내는 성분이라고 정의할 수 있다.

방류수 분석에서 제1요인은 POC, TSS, VSS, T-N, sT-N과 높은 양의 인자부하량을 가지고 있다. 이는 생

물학적 처리 후 침전에 의해 제거되지 않은 미세 입자 및 미생물 성분을 나타내는 오염물질로 정의할 수 있어 처리공정에서 발생한 슬러지의 침강성과 상관성이 큰 것으로 해석된다. 제 2요인은 TOC, DOC, TCOD<sub>Mn</sub>, SCOD<sub>Mn</sub>, TBOD<sub>5</sub>, SBOD<sub>5</sub>과 높은 양의 인자부하량을 가지고 있어 생물학적 처리 이후 남아 있는 난분해성 유기물질을 나타내는 성분이라고 판단되며 생물학적 처리의 적절성여부를 판단할 수 있는 주성분이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 방류수 유기물질 지표 전환에 앞서 생물학적처리 공정에 따른 유기물질의 거동을 분석하고, 새로이 도입되는 TOC와 기존 유기물질 지표와의 상관관계를 분석하였다.

1. 생물학적 처리 공법에 따른 유기물질의 제거효율은 TOC, COD<sub>Cr</sub>, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub> 각각 93.7, 91.4, 91.7, 86.9%가 제거되었으며, 현재 운영중인 공공하수처리시설에서 일정량의 TOC가 제거가 가능한 것으로 분석되었다. 하지만 타 유기물질에 비해 제거효율이 상대적으로 낮아 난분해성 유기물질에 대한 추가적인 고려가 필

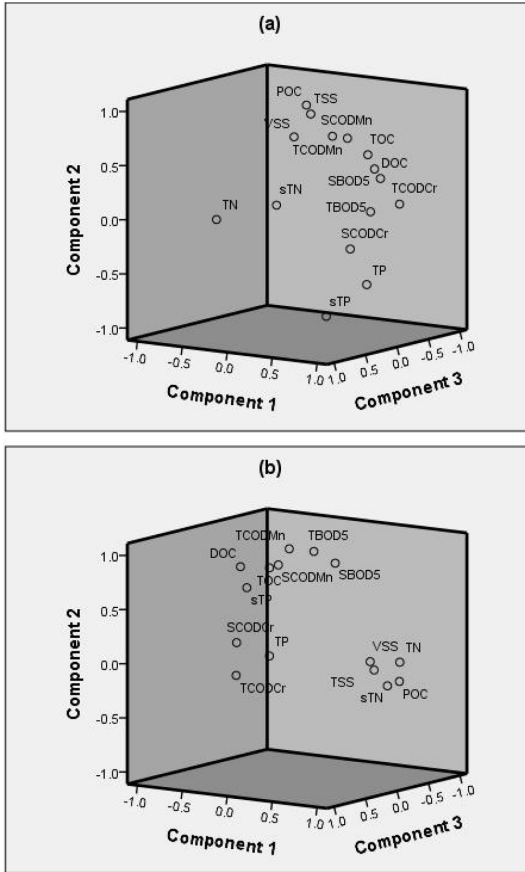


Fig. 3. Factor loading plots using PCA of normal varimax rotation: (a) influent and (b) effluent.

요할 것으로 판단된다.

2. 하수처리장 유기물질간 Pearson correlation analysis를 실시한 결과, TOC는 기존 유기물질 항목과 높은 상관관계를 나타내는 것으로 분석되어, 향후 공공하수처리시설의 방류수 수질 기준에 유기물질 지표로  $COD_{Mn}$ 을 대체하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

3. 유입원수와 방류수의 주성분 분석 결과 유입원수 성분분석에서 요인 1은 기여율 59.1%이며 TOC, DOC,  $TCOD_{Cr}$ ,  $SCOD_{Cr}$ ,  $TBOD_5$ ,  $SBOD_5$ 와 양의 인자부하량을 나타내었고, 방류수 성분분석에서 요인 1은 기여율 44.2%이며 POC, TSS, VSS, T-N, s-T-N과 높은 양의 인자부하량을 나타내었다.

본 연구를 통하여 향후 수질 지표로서 TOC의 적용 가능성, 지표전환에 대한 기초자료로서 의의를 가질 것이라 사료된다. 다만 시료수가 제한적이고, 하수처리시설의 운전조건의 차이가 존재하므로 결과의 보다 적절한 활용을 위하여 추가적인 자료의 확보가 요구된다.

## 참고문헌

- 김재구, 신명선, 장창원, 정성민, 김범철, “한강수계 주요 하천과 호수내 TOC와 DOC 분포 및 BOD와 COD의 산화율 비교”, *수질보전 한국물환경학회지*, 2007, 23(1), 72-80.
- 변주대, 김태동, 정병훈, 심태섭, 김현욱, “하수처리장 방류수 중 유기물 함량 지표로서 총유기탄소의 활용”, *한국환경분석학회지*, 2010, 13(2), 99-103.
- 최성화, 김경선, 이유정, 손정원, 조은정, 유평중, “부산 지역 하천의 총유기탄소(TOC)와 유기물 오염지표와의 상관관계에 관한 연구”, *보건환경연구원보*, 2013, 23(1), 124-133.
- 국립환경과학원, “TOC 규제기준 도입을 위한 기본계획 연구”, 2012.
- 최지용, 한대호, “유기물 수질지표로서 TOC 환경기준 설정에 관한 연구”, *서울도시연구*, 2011, 12(3), 173-184.
- 환경부, <http://www.me.go.kr>, 2014년 9월.
- 성진욱, 박제철, “낙동강 수계 내 하수처리 방류수가 하류 하천 유기물에 미치는 영향: 부하량 비교”, *한국하천호수학회지*, 2012, 45(2), 2010-2017.
- 박현건, 차연화, “합천호 상류수계의 수질인자간 상관관계에 관한 고찰”, *대한환경공학회*, 2013, 35(2), 94-100.
- 정봉길, 김성용, 김철수, 이석형, 황성민, 박노진, 정유진, 옥근, “남동해 연안 퇴적물 중 PCDD/Fs 및 Dioxin Like PCBs(DLPCBs)의 주성분 분석”, *한국환경분석학회지*, 2007, 10(4), 226-236.
- 노형진, “(Excel 및 SPSS를 활용한) 다변량분석 이론과 실제”, 2010, 71-95, 한울출판사.
- 서용찬, 김기동, “남한강 북쪽 유역 하수종말처리장의 24시간별 수질 변화 분석”, *한국환경분석학회지*, 2007, 10(2), 98-104.
- 이태환, 이보미, 허진, 정명숙, 강태구, “회귀식을 사용한 하수처리장 방류수  $COD(Mn)$  농도의 총 유기탄소 및 난분해성 물질 농도 전환”, *수질보전 한국물환경학회지*, 2010, 26(6), 969-975.
- 박중수, “총 유기탄소(TOC)의 분석방법 및 수질기준 개발”, 2014, 전남대 박사학위논문.