

공공하수처리시설의 방류수 수질기준 개선 연구 - BOD₅를 CBOD₅로의 전환에 관한 고찰

수질화학팀 · *물환경생태팀

양진영 · 신덕영 · 박서희* · 이진 · 홍주희 · 하현주*
최예덕 · 이준연 · 김진아 · 배경석 · 전재식 · 정권

A Study on the Improvement of Effluent Water Quality Standards at Public Sewage Treatment Facilities - Conversion of CBOD₅ to BOD₅ as an Organic Matter Index

*Water Chemistry Team, *Aquatic Ecology Team*

**Jin-young Yang, Deok-young Shin, Seo-hee Park*, Jin Lee,
Ju-hee Hong, Hyun-ju Ha*, Ye-duk Choi, Jun-yeon Lee,
Jin-a Kim, Kyung-seok Bae, Jae-sik Jeon and Kweon Jung**

Abstract

This study was aimed at investigating the possibility of replacing BOD₅ with CBOD₅ as an indicator of the effluent water quality standards at public sewage treatment facilities. We analyzed the CBOD₅ using a nitrification inhibitor for the influent and the effluent at 4 sewage treatment plants in Seoul and the nearby rivers. The average effluent NOD/BOD ratio was 51.7%, while the average CBOD₅ concentration was 0.2~3.8 mg/L. Therefore, the NOD could affect the results of BOD₅ after 5 days of incubation, unlike the influent samples. Even though the concentrations of ammonia nitrogen were low, NOD was present in the effluents and the rivers. Cases of high NOD occurred where the removal efficiency of inorganic nitrogen was low, in a river downstream of the JN sewage treatment plant. The average effluent BOD₅ concentration was 0.6~24.7 mg/L, with a treatment efficiency of 96.2%. This was determined to be lower than the corresponding CBOD₅ concentration. CBOD₅ could indicate low to moderate biodegradable organic concentrations in the effluent, irrespective of NOD. Therefore, the replacement of BOD₅ as an indicator of organic matter in the effluents at public sewage treatment plants should be further discussed.

Key words : CBOD₅, BOD₅, NOD, NOD/BOD ratio, organic indicator

서론

수중 호기성 미생물은 유기물과 질소화합물을 분해하는 과정에 산소를 소모하는데, 이때 소모된 산소량으로 유기물과 질소화합물의 양을 간접적으로 추정하여 얻은 값을 생물화학적 산소요구량(BOD, Biochemical Oxygen Demand)이라 한다. 배양 후 8~10일까지는 탄소성 유기물을 분해하는 중속영양미생물에 의해 산소가 소모되며, 이후에는 무기질소화합물을 분해하는 독립영양미생물인 질산화세균에 의해 산소가 소모되는 것으로 알려져 있다.

현재 하천의 수질환경기준, 폐수와 방류수의 배출허용기준에서는 5일 동안 호기성 미생물의 증식과 호흡에 소비되는 용존산소의 양을 측정된 BOD₅(5-dayBOD)를 적용하고 있다. BOD₅는 유기물의 간접지표로, COD(화학적 산소요구량, Chemical Oxygen Demand)와 더불어 오랫동안 수질오염을 판단하는 기준으로 사용하고 있다. 또한 최근 4대강에 대한 수질오염총량관리제도의 시행으로 유기물 부하량 산정의 지표로 활용하고 있다. BOD₅를 통해서 유기물로 인한 수질오염도, 생물학적으로 분해가능한 물질의 양, 폐수 및 하수 등의 제거효율(처리효율) 등을 알 수 있다.

일반적으로 BOD₅는 탄소BOD(CBOD, Carbonaceous Oxygen Demand)로 인식되어 왔다. 그 이유는 질산화세균(Nitrifying bacteria)의 성장속도가 느려서 배양하는 5일 동안 그 수가 적어, 질산화로 인한 산소 소모(NOD, Nitrogenous Oxygen Demand)가 BOD₅에 영향을 주지 않기 때문이다. 하지만, 생물학적 2차 처리수 등에는 충분한 양의 질산화세균이 분포하여(1), 배양하는 5일 동안 질산화세균에 의해 암모니아성 질소와 아질산성 질소를 분해하고, 이 과정에서 산소가 소모되어 높은 BOD₅가 발생할 가능성이 높다. 국내의 한 연구에서는 활성슬러지 유출수의 BOD분석 실험시 NOD가 배양하는 초기부터 발생하였으며, 3일째부터 질산화가 급격히 발생하는 것으로 보고하였다(2).

질산화(Nitrification)로 인한 산소 소모는 2단계에 걸쳐 일어나며, 암모니아 산화세균(AOB,

Ammoniaoxidizing bacteria)에 의해 암모니아성 질소를 아질산성 질소로 산화시키는 1단계와 아질산 산화세균(NO₂, Nitrite-oxidizing bacteria)에 의해 아질산성 질소를 질산성 질소로 산화시키는 2단계로 구성된다. 암모니아 산화세균은 *Nitrosomonas*, *Nitrosospira*, *Nitrosococcus* 등이 있으며, 아질산 산화세균은 *Nitrospira*, *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrospina* 등이 있다(3~5). 최근에 분자생물학적 분석방법의 발달로 혐기성 환경에서도 암모니아를 산화하는 *Brocardia anammoxidans*와 고세균 중에서도 암모니아를 산화하는 세균(AOA, ammonia-oxidizing archaea), 탈질세균 중에서도 *Pseudomonas sp.*, *P. faecalis* 등 다양한 세균들이 질산화에 기여하는 것으로 밝혀지고 있다(6~10).

이러한 질산화세균은 2차 처리시설의 방류수를 배양하는 5일 동안에 현저하게 산소를 소모할 수 있을 정도로 충분한 양을 포함하는 경우가 있다. 실규모의 생물학적 처리시설의 방류수를 대상으로 한 조사에서 아질산 산화세균(NO₂)인 *Nitrospira*가 10¹³ cells/L, *Nitrobacter*가 10¹² cells/L으로 존재하여 다량으로 분포하는 것으로 보고하였다(11). 암모니아 산화세균(AOB)을 조사한 연구에서 전체 세균의 약 0.01~2.8%에 해당하는 10⁹~10¹¹ cells/L의 수준으로 나타나, 활성슬러지 처리시설에 암모니아 산화세균이 다량으로 분포하는 것으로 보고하였다(12).

1980년대 미국에서는 BOD₅의 수질위반 사례 중 60% 이상이 부적절한 시설 구조나 운영보다는 BOD₅ 실험시 질산화로 인해 발생하였다고 보고하였다(13). 현재 미국은 공공하수처리시설의 2차 처리수에 대해 BOD₅와 CBOD₅의 기준을 설정해서 관리하고 있으며, 유럽은 하수처리시설의 방류수 기준에는 질산화를 배제한 CBOD₅로 관리토록 권고하고 있다(14~16). 개정된 Standard Method의 15판(1981)에서도 2차 처리수나 오염된 물에 대해서 모두 질산화억제제 사용을 권고하였다.

반면, 국내의 수질오염공정시험기준에는 CBOD₅를 측정할 경우에 질산화 억제제를 사용할 수 있다고 명시하고 있지만, 공정조사 및 연구목적 등에 사용하는 경우에 한해서 가능하며, 질산화

억제제를 투입한 BOD₅ 결과값을 법적 기준으로 인정하지 않고 있는 실정이다(17, 18).

현재 국내의 방류수 수질기준은 논리적인 체계를 통해 설정되지 않았고, 방류수의 수질기준 강화 및 신설에 대한 설정기준도 명확하지 않은 실정이다(16). 그러므로 논리적인 항목 선정 및 수질기준치 설정체계가 필요하며, 주기적이면서 장기적으로 변경 또는 개정을 통해 수시로 변화하는 환경에 맞추어야 한다(19). 이런 측면에서 공공하수처리시설의 방류수 수질기준인 BOD₅에 대해서도 그 기준의 적정성 여부를 검토하여 개선할 필요성이 있다.

하수처리시설 방류수의 BOD₅는 NOD로 인해 실제보다 높은 값을 나타낼 가능성이 높다. 특히 비이상적으로 높아지는 경우가 발생할 경우에 처리시설의 운영조건 변경이나 불필요한 시설 개선 등이 필요하게 되고, 때로는 수질기준초과로 인한 부과금 등의 행정처분으로 경제적 손실을 야기할 수도 있기 때문에 정확한 원인을 파악하는 것이 중요하다.

본 연구는 방류수 수질기준인 BOD₅의 한계를 알아보고, 그 대안으로 CBOD₅로의 전환 가능성에 대해 알아보려 하였다. 이를 위해 서울시에 위치한 4곳의 하수처리시설을 대상으로 유입수와 방류수에 대해 질산화억제제를 사용하여 CBOD₅를 분석을 실시하였다. BOD₅에 NOD의 기여도를 평가하였고, 무기질소의 분포특성 및 NOD와의 상관성 분석, 유기물의 분포특성 및 유기물의 간접 지표간 상관성 분석을 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사대상 및 기간

본 연구는 서울시에 위치한 4곳의 공공하수처리시설의 유입수와 방류수를 대상으로 하였으며, 인근 하천 2점을 대조군으로 선정하였다. 채수지점은 난지 하수처리시설에서 3지점(NJ, NJ #1, NJ #2), 서남 하수처리시설에서 3지점(SN, SN #1, SN#2), 중랑 하수처리시설에서 4~5지점(JN #2, JN #3, JN #2(A₂O), JN #3(MLE), JN #4(AS)

과 탄천 하수처리시설에서 3지점(TC, TC #1, TC #2)이었으며, 방류수의 경우 소독제인 잔류염소의 영향을 배제하기 위해 최종방류구가 아닌 최종침전지의 월류 지점에서 채수하였다. 하천 시료는 중랑 하수처리시설의 방류수의 영향이 없는 광진구에 위치한 군자교(GJ)와 방류수의 영향을 받을 것으로 예상되는 성동구에 위치한 살곶이다리(SG)에서 채수하였다.

하수 유입수와 방류수에 대해서는 2013년 9월의 예비조사를 시작으로 2015년 12월까지 총 16회에 걸쳐 시료를 채수하고 분석을 실시하였다. 하천시료는 2015년 동안 총 4회 채수하였으며, 중랑 하수처리시설의 방류수의 채수일정과 동일하도록 하였다.

2. 분석방법

1) 유기물질의 지표항목 및 NOD 측정

수질오염공정시험기준에 따라 하수처리시설의 유입수와 방류수, 하천수를 300 mL BOD병에 초기 용존산소량의 40~70% 정도 수준으로 소모될 수 있도록 적절히 희석(P)하여 시료를 넣은 후 초기 용존산소량(DO1)을 측정하고, 5일 동안(20 ± 1) °C에서 배양 후 남아있는 용존산소량(DO2)을 측정하여 식 (1)에 따라 BOD₅를 구하였다.

$$BOD_5(\text{mg/L}) = (DO1 - DO2) \times P \quad (1)$$

동시에 CBOD₅를 측정하기 위해 300 mL BOD 병에 시료 적당량과 질산화 억제제시약인 Allythiourea (ATU) 40 g/L를 0.3 mL 첨가한 후 식중 희석수로 채웠다. 이때 식중 희석수는 하수 유입수 1% 농도로 제조하였다. CBOD₅는 식 (2)에 따라 계산하여 결과값을 얻었다.

$$CBOD_5 = ((DO1 - DO2) - (B1 - B2) \times f) \times P \quad (2)$$

여기서

B1 : 식중액의 BOD를 측정할 때 희석된 식중액의 배양전 DO(mg/L)

B2 : 식중액의 BOD를 측정할 때 희석된 식중액의 배양후 DO(mg/L)

f: 회석시료 중의 식중액 함유율 (x%)과 회석한 식중액 중의 식중액 함유율 (y%)의 비(x/y)

NOD는 식 (3)에 따라 계산하여 결과값을 얻었다.

$$NOD = BOD_5 - CBOD_5 \quad (3)$$

NOD 기여율(%)은 위식에서 얻은 값들을 식 (4)에 대입하여 결과값을 얻었다.

$$NOD \text{ 기여율}(\%) = NOD / BOD_5 \times 100 \quad (4)$$

COD는 산성조건에서 과망간산칼륨의 소비량으로 측정하였으며, 총유기탄소(TOC, Total Organic Carbon)는 분석장비(Shimadzu TNM-L)를 사용하여 측정하였다.

2) 무기질소 측정

수질오염공정시험기준에 따라 시료 중 암모니아성 질소(NH₄⁺-N), 아질산성 질소(NO₂-N)와 질산성 질소(NO₃-N)의 농도를 측정하기 위해 시료를 0.45 μm 여지로 여과하여 사용하였다. NH₄⁺-N는 페놀과 반응하여 생성된 인도페놀의 청색을 UV/Visible Spectrometry(Beckman Coulter DU 800)를 사용하여 630 nm에서 측정하였고, NO₂-N와 NO₃-N는 이온크로마토그래피(Metrohm 800 series)로 측정하였다. 총질소(TN, Total Nitrogen)는 연속자동분석기(Lachat Instruments, Quikchem 8500 series 2)로 여과하지 않은 시료를 사용하여 분석하였다.

3) 자료처리

측정한 자료의 통계분석은 Excel 2013을 사용하였으며, 상관성 분석은 SPSS 20 version을 활용하였다.

결과 및 고찰

1. BOD₅, CBOD₅와 NOD의 관계

유입수는 그림 1에서 보듯이 BOD₅의 74.9~87.7%가 CBOD₅로 이루어져 있어, 배양하는 5일

동안 대부분의 산소가 유기물 분해에 소모되는 것으로 나타났다. 그 결과 BOD₅ 분석에 NOD가 기여한 정도가 낮게 나타났다. 일부 시료에서 NOD/BOD 비가 69.8%인 경우도 있었지만, 평균값 16.5%의 수준을 보여, 민경우(20)의 연구결과인 10~15%와 유사하였으며, 장세주(2)의 조사결과인 3.8~14.4%와도 유사한 경향을 보였다. 국외 사례를 살펴보면 Washington(21)은 3곳의 하수처리장 유입수의 조사에서 NOD/BOD 비를 평균 24~48%로 보고하였는데, 본 연구보다 다소 높은 결과값을 보여, 국내와 국외의 하수 유입수의 성장차이가 원인으로 추정된다.

방류수는 그림 2에서 보듯이 BOD₅의 49.9~75.2%가 NOD로 구성되어, CBOD₅는 BOD₅의 38.8%내외의 수준으로 나타났다. NOD/BOD 비는 평균 51.7%의 수준을 보여, NOD/BOD 비를 평균 77.4%로 보고한 장세주(2)의 결과보다는 다소 낮았으나, 45~56%로 보고한 민경우(20)의 결과값, 그리고 43.4%로 보고한 손수민(22)의 결과값과 평균 44%로 보고한 강지호(23)의 결과값과

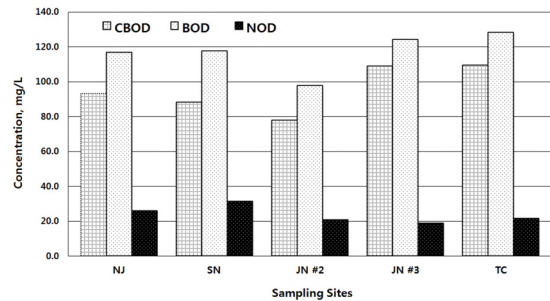


Fig. 1. Concentrations of CBOD, BOD and NOD in sewage influent.

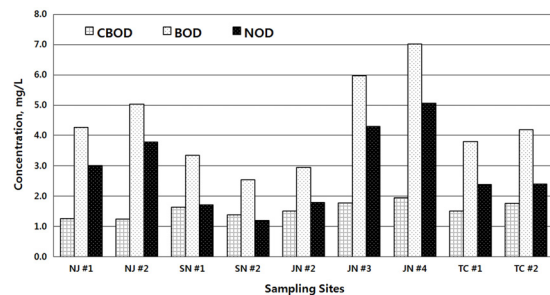


Fig. 2. Concentrations of CBOD, BOD and NOD in sewage effluent.

는 10%내외의 유사성을 보였다. 국외 사례를 살펴보면 일본의 생물학적 처리시설의 방류수에서 NOD/BOD 비가 약 70%로 조사되었는데(24), 이는 본 연구보다 높은 수준이었지만, Washington (21)의 조사에서 평균 43~75%, Hall & Foxen (13)는 질산화 시설의 방류수에서 43~86%로 보고하였으며, 2차 처리시설의 방류수에 대해 24~79%로 보고해 본 연구와 유사한 경향을 보였다.

NJ #1과 NJ #2에서 3회 이상 방류수 수질기준을 초과한 결과를 보였는데, 이때 BOD₅는 17.8~24.7 mg/L, CBOD₅는 1.3~2.2 mg/L 그리고 NOD는 15.6~22.5 mg/L의 수준으로 NOD/BOD 비가 87.6~94.2%에 달했다. JN #2~#4 지점에서도 6회 정도 기준을 초과한 것으로 나타났는데, BOD₅는 10.6~21.3 mg/L, CBOD₅는 1.8~3.2 mg/L와 NOD는 8.3~18.1 mg/L의 수준으로 NOD/BOD 비가 74.8~87.5%였다. 즉, NOD 결과에 따라 BOD₅가 비이상적으로 상승할 수 있음을 알 수 있었다.

하수처리시설의 방류수의 하천 영향을 알아보기 위해 대조군으로 선택한 GJ 지점과 영향권 내에 SG 지점의 분석결과를 그림 3에 나타내었다. GJ 지점은 NOD/BOD 비는 평균 27.4%였고, SG 지점은 평균 71.4%의 수준이었는데, 이는 손수민(21)의 하천 연구에서 조사한 16.1%, 일본의 Shutou(24)의 조사에서 Onga 강의 평균 13.6%보다 높은 수준이었다. 그러나 Deal(25)의 연구에서 질소화합물질 배출원의 방류수가 유입되는 Lee 강을 대상으로 상류에 위치한 저수지의 물을 방류하는 시기에 따라 하천이 받는 영향이 상이함을

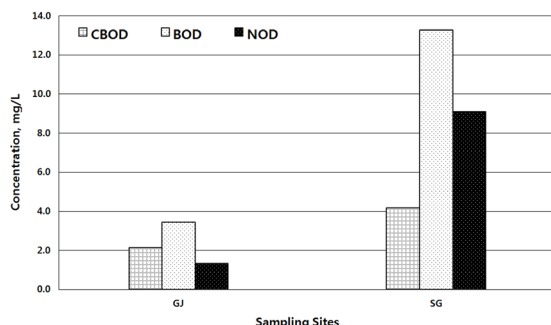


Fig. 3. Concentrations of CBOD, BOD and NOD in river.

보고하였는데, 방류시기에는 NOD/BOD 비가 평균 37.9%였지만, 방류가 없는 시기에는 62.0%로 보고해, SG 지점의 NOD/BOD 비와 유사한 것으로 나타났다. 이는 SG 지점의 질소화합물의 분포 특성이 저수지의 방류가 없는 시기의 Lee강과 유사한 수준인 것으로 추정된다.

분석과정에서 BOD₅보다 CBOD₅가 높게 나타나는 경우가 유입수에서 22건, 방류수에서 4건이 발생하여 통계처리시 NOD 값을 0으로 간주하였다. 원인은 하수 유입수의 경우 많은 유기물을 함유하고 있기 때문인 것으로 판단된다. Albertson(26)은 질산화 억제 시약을 사용하는 CBOD₅의 측정 방법은 유기탄소가 적은 시료에 적용해야한다고 주장하였는데, 그 이유는 미처리된 하수의 경우 CBOD₅ 측정값에 20%까지 큰 오차를 유발할 수 있기 때문인 것으로 보고하였다. 또한 질산화 세균은 독립영양미생물로 유기물을 싫어한다는 실험 결과도 이를 뒷받침 하는 근거라고 판단된다(23, 27). 방류수의 경우 뚜렷한 원인을 알 수 없었지만, 저농도로 분포하는 유기물을 측정하는 과정에서 실험오차가 발생한 것으로 추정된다.

2. 무기질소 분포특성

유입수는 총질소의 80.6~84.9%가 암모니아성 질소로 구성되어 있었고, 방류수는 35.5~74.8%가 질산성 질소로 구성되어, 하수처리과정에서 유입수의 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화된 것으로 판단된다(그림 4와 5). 예외적으로 JN #4에서 암모니아성 질소 농도가 질산성 질소 농도보다 높게 나타났는데, 유일하게 JN #4의 경우 활성슬러지 공법으로 운영되어 별도의 질산화공정이 없기 때문에 암모니아성 질소의 산화율이 낮았던 것으로 판단된다. 공정별로 살펴본 암모니아성 질소의 처리효율에서 MLE 공법은 평균 86.9%, A₂O 공법은 91.6%이었으며, AS 공법에서 73.2%로 가장 낮게 나타났다(표 1). 아질산성 질소는 유입수와 방류수 모두에서 낮은 농도로 나타났다. 대조군으로 선택한 GJ 지점은 총질소의 대부분이 질산성 질소로 질산화가 거의 완료되었지만, SG 지점은 총질소의 구성이 질산성 질소와 암모니아성 질소로 이루어져 있어 질산화가 진행단계에 있

었다. 특히, GJ 지점의 암모니아성 질소 농도인 0.3 mg/L를 배경농도로 할 때, JN의 평균 방류농도인 3.7 mg/L가 합쳐져, SG 지점에서 평균 4.1 mg/L로 나타난 것으로 추정된다(그림 6). 즉 JN #2~4 방류수가 인근 하천의 질소배출원의 역할을 하는 것으로 판단된다.

NOD값에 영향을 줄 것으로 예상되는 암모니아성 질소와 아질산성 질소에 대해 상관분석을 실시하여 표 2에 나타내었다. 유입수의 무기질소 항목은 NOD와 상관성을 나타내지 않았지만, 방류수는 낮은 수준의 상관관계를 보였으며, 유의한 수준으로 나타났다. 결국, 방류수에 존재하는 암모니아성 질소는 배양초기에 NOD를 발생시키는 영향 인자 중 하나인 것으로 판단된다. 그 예로 그림 5에서 보듯이 JN #4는 다른 지점에 비해 높은 암모니아성 질소를 나타내었고, 그 결과 그림 2에서처럼 높은 NOD가 나타난 것으로 판단된다. 하천수는 암모니아성 질소와 NOD간 높은 상관관계를 보였지만, 시료수가 총 7건에 불과하여 유의미한 결과를 얻기 위해서는 추가적인 조사가 필요하다고 판단된다.

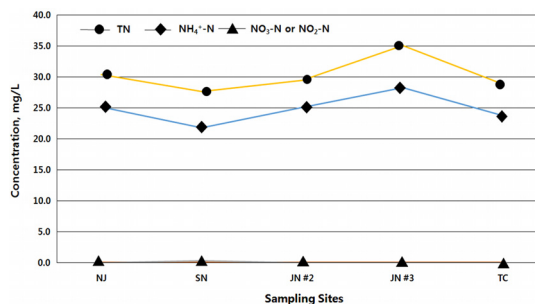


Fig. 4. Concentrations of Nitrogen compounds in sewage influent.

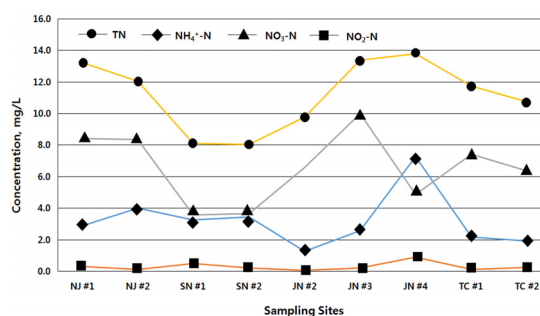


Fig. 5. Concentrations of Nitrogen compounds in sewage effluent.

Table 1. Treatment efficiency at sewage treatment plants in Seoul

| Site | Process | Treatment Efficiency(%) | | | | | |
|-------|------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|------|------|---------------------------------|
| | | BOD | CBOD ¹⁾ | CBOD ²⁾ | COD | TOC | NH ₄ ⁺ -N |
| NJ #1 | MLE | 96.0 | 98.7 | 98.8 | 84.6 | 78.4 | 87.1 |
| NJ #2 | MLE | 95.6 | 98.6 | 98.9 | 86.2 | 79.6 | 81.8 |
| SN #1 | MLE | 97.0 | 98.0 | 98.3 | 85.1 | 79.5 | 84.2 |
| SN #2 | MLE | 97.6 | 98.4 | 98.6 | 86.4 | 79.2 | 82.6 |
| JN #2 | A ₂ O | 96.9 | 98.1 | 98.4 | 87.3 | 79.8 | 94.6 |
| JN #3 | MLE | 95.3 | 98.4 | 98.5 | 85.2 | 81.9 | 91.7 |
| JN #4 | AS | 94.2 | 98.2 | 98.3 | 84.7 | 81.3 | 73.2 |
| TC #1 | MLE | 96.9 | 98.6 | 98.9 | 83.2 | 80.0 | 90.5 |
| TC #2 | MLE | 96.3 | 98.3 | 98.6 | 82.1 | 81.2 | 91.4 |

$$\text{Treatment Efficiency(\%)} = \frac{\text{Influent Concentration(mg/L)} - \text{Effluent Concentration(mg/L)}}{\text{Influent Concentration(mg/L)}} \times 100$$

- 1) 유입수의 CBOD 결과값을 기준으로 함
- 2) 유입수의 BOD 결과값을 기준으로 함

Table 2. Pearson correlation coefficients between NOD and inorganic nitrogen measured in sewage influent, effluent and river

| Sites | Parameters | NH ₄ ⁺ -N | NO ₂ -N | Samples |
|----------|------------|---------------------------------|--------------------|---------|
| Influent | NOD | -0.152 | 0.023 | 77 |
| Effluent | NOD | 0.358** | 0.044 | 134 |
| River | NOD | 0.826** | 0.549 | 7 |

*: p<0.05, **: p<0.01, p: signification level

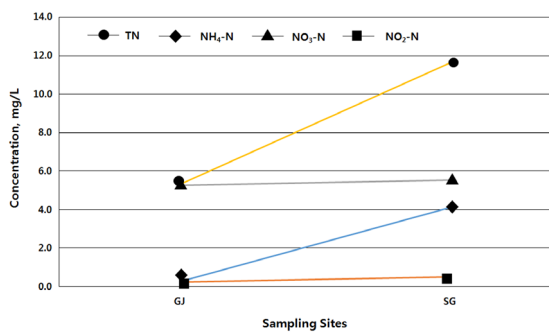


Fig. 6. Concentrations of Nitrogen compounds in river.

3. 유기물 간접지표의 분포특성

유입수는 CBOD₅를 1로 가정하였을 때, BOD₅는 1.1~1.3, COD는 0.5~0.6, TOC는 0.2~0.3의 비율을 보였다(그림 7). BOD₅는 CBOD₅, COD, TOC 간 낮은 상관성을 보였지만, 유의미한 수준(p<0.05)으로 나타나, 유기물 간접지표로써 BOD₅를 적용하는 것에는 별 무리가 없다고 판단된다.

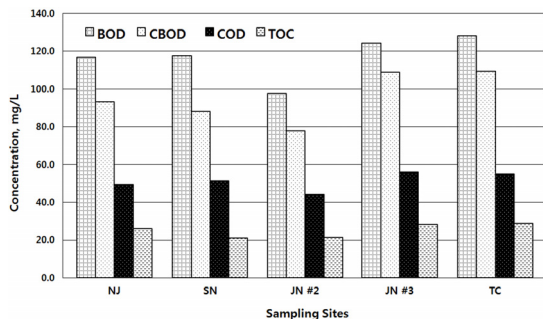


Fig. 7. Concentration of organic matters indices measured in sewage influent.

방류수는 처리과정에서 생물학적으로 분해 가능한 유기물의 약 98.4%가 제거되어, BOD₅는 평균 4.28 mg/L, CBOD₅는 평균 1.55 mg/L 수준으로 방류되는 것으로 나타났다. 여기서 CBOD₅는 평균 0.2~3.8 mg/L의 범위를 나타내어 BOD₅의 기준인 10 mg/L 이내 수준으로 하수처리시설에서 제거되어 방류되는 것으로 나타났다. 하지만 BOD₅는 평균 0.6~24.7 mg/L의 범위를 보였고, 처리 효율은 96.2% 수준으로, BOD₅를 기준으로 할 경우에 하수처리시설의 처리효율이 과소평가 될 수 있었으며, 기준을 초과하는 사례가 발생하기도 하였다. 방류수에서 BOD₅는 COD 및 TOC 간 전혀 상관성이 없는 것으로 나타났고, CBOD₅를 1로 가정하였을 때, BOD₅는 1.8~4.0, COD는 3.7~6.0, TOC는 2.4~4.1의 비율로 보여, 생물학적 처리를 거친 후 수질특성이 유입수와는 다른 것으로 나타났다(표 3 및 그림 8). 한편, CBOD₅는 다른 유기물 지표와 낮은 상관성을 보여, CBOD₅ 만으로는 방류수의 유기물 특성을 대표할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서, 생물학적으로 분해 가능한 유기물은 CBOD₅로 측정하고, 난분해성 유기물은 COD 또는 TOC로 구분하여 평가해야 한다고 판단된다.

국내 연구는 주로 하수처리시설 방류수를 대상으로 BOD₅와 TOC의 상관관계를 분석하였는데, 서희정(28)의 연구에서 BOD₅와 TOC는 0.498 (p>0.05)으로 조사되었고, 정동환(29)의 연구에서 BOD₅와 TOC의 상관계수를 0.341(0.000)로 보고하였으며, 성진욱(30)의 연구에서 BOD₅와 TOC 간 상관계수를 0.991 보고해 본 연구보다 높은 상관관계를 보였다. 여기서 BOD₅ 대신 CBOD₅

Table 3. Pearson correlation coefficients among organic matters indices measured in sewage influent, effluent and river

| Sites | Parameters | BOD ₅ | CBOD ₅ | COD | Samples |
|----------|------------|------------------|-----------------------|---------|---------|
| Influent | COD | 0.398** | 0.670* | - | 77 |
| | TOC | 0.465** | 0.588* | 0.609** | 50 |
| Effluent | COD | 0.090 | 0.295** ¹⁾ | - | 134 |
| | TOC | 0.146 | 0.390** ²⁾ | 0.836** | 90 |
| River | COD | 0.970** | 0.851* | - | 7 |
| | TOC | 0.911* | 0.881* | 0.908** | 7 |

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, p: signification level, 1) 128건, 2) 84건

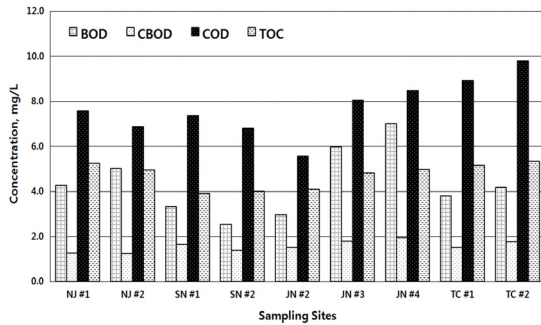


Fig. 8. Concentration of organic matters indices measured in sewage effluent.

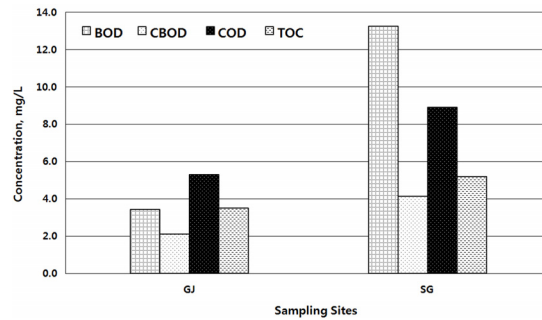


Fig. 9. Concentration of organic matters indices measured in river.

를 적용한다고 가정할 경우, CBOD₅와 TOC간 상관관계가 0.390으로 정동환(29)의 연구 결과와 유사하게 나타나, 본 연구에서 BOD₅ 실험에 NOD의 영향이 크게 작용한 것으로 판단된다.

하천의 유기물 지표에 대한 분석결과를 그림 9에 나타내었다. GJ 지점과 SG 지점에서 CBOD₅, COD, TOC의 분포는 유사한 경향을 보였지만, BOD₅에서는 큰 차이를 보였다. 원인은 NOD로 인해 BOD₅가 비이상적으로 크게 상승한 것으로 추정된다. 표 3에서 보듯이 BOD₅와 TOC간에는 높은 상관성이 나타났는데, 이는 국내의 많은 연구에서도 유사한 경향을 보였다(28, 30~32). 또한, CBOD₅와 TOC 및 COD간에도 높은 상관성을 보였는데, 시료수가 7건에 불과해 상관성 분석을 위해서는 추가적인 조사가 필요한 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 하수처리시설의 방류수 수질기준 전환 가능성에 대해 알아보고자 서울시에 위치한 4개 하수처리장의 유입수, 방류수 그리고 인근 하천시료에 대해 질산화억제제를 넣어 CBOD₅를 분석하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유입수의 BOD₅는 대부분이 CBOD₅로 이루어져 있었으며, 그 결과 NOD/BOD비가 평균 16.5%를 나타내어 BOD₅ 분석에 NOD가 미치는 영향이 낮은 것으로 판단된다. 반면, 방류수의 BOD₅는 평균 49.9~75.2% 비율로 NOD가 기여하는 것으로 나타났으며, NOD/BOD 비는 평균 51.7%로, NOD 결과에 따라 BOD₅가 크게 영향을 받는 것으로 나타났다.

대조군으로 선택한 살곶이다리 지점의 NOD/BOD 비가 74.1%로 높게 나타났는데, 이는 중량하수처리장 방류수의 영향으로 BOD₅가 상승한 것으로 판단된다.

2. 질산화공정이 없는 기존활성슬러지 공정에서 미처리된 암모니아성 질소의 농도가 높았으며, NOD 결과도 다른 공정에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 또한 중량하수처리장 방류수의 영향을 받는 살곶이다리 지점은 군자교 지점과는 대조적으로 암모니아성 질소의 농도가 높았고, 그 결과 NOD도 높은 경향을 보였다. 그러므로 방류수의 암모니아성 질소는 NOD 발생에 기여하는 인자 중 하나인 것으로 판단된다.
3. 방류수의 유기물 특성은 유입수와 달리, 하수처리시설에서 충분히 유기물질이 제거되어 생물학적으로 분해 가능한 유기물이 적게 분포하는 것으로 나타났다. 제거율(처리효율) 평가시 CBOD₅를 기준으로 적용했을 때에는 평균 98.4%였고, BOD₅를 적용하였을 때에는 평균 96.2% 수준을 보여, BOD₅ 항목을 지표로 활용할 경우에 유기물 처리효율을 낮게 평가할 수 있는 것으로 나타났다. 상관분석에서 BOD₅는 COD와 TOC 간 상관성이 전혀 없었고, CBOD₅는 낮은 상관성을 보여 BOD₅ 또는 CBOD₅로는 나타낼 수 없는 유기물 특성이 존재하는 것으로 판단된다.
4. 현재 하수처리시설의 방류수 수질기준인 BOD₅는 유기물 특성과 암모니아성 질소에 의해 NOD 발생가능성이 크기 때문에 실제적인 유기물의 지표로써 한계가 있는 것으로 나타났다. 이런 문제점 때문에 방류수내 생물학적으로 분해 가능한 유기물은 CBOD₅로 측정하여 제거효율 산정 및 수질기준으로 적용할 필요성이 있으며, 유기물의 간접지표로써 BOD₅를 CBOD₅로의 전환에 대해 논의할 시점이라고 판단된다.

참고문헌

1. Sawyer and McCarty : Chemistry for Environmental Engineers, 3rd Ed. McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y., 1978.
2. 장세주, 이성호, 박해식, 박청길 : 하수처리장 유출수의 NOD를 고려한 BOD 측정에 관한 연구. J. of Korean Society on Water Quality, 23(2):188~192, 2007.
3. Freitag, TE, Chang, L, Clegg, CD and Prosser, JI : Influence of inorganic nitrogen management regime on the diversity of nitrite-oxidizing bacteria in agricultural grassland soils. Appl. Environ. Microbiol. 71:8323~8334, 2005.
4. Siripong, PHA and Sokal, RR : Diversity study of nitrifying bacteria in full-scale municipal wastewater treatment plant. Water Res. 41:1110~1120, 2007.
5. 정순재, 이상일, 이동훈 : 폐수처리장치에서의 아질산염 산화 세균 군집 분석. The Korean Journal of Microbiology, 44:29~36, 2008.
6. Schmidt, I, Hermelink, C and Jetten, M : Anaerobic ammonia oxidation in the presence of nitrogen oxides(NO_x) by two different lithotrophs. Appl. Environ. Microbiol., 68:5351~5357, 2002.
7. Madigan, MT, Martinko, JM, Dunlap, PW and Clark, DP : Anammox. Brock Biology of microorganism, 12:603 ~604, 2009.
8. Park, HD, Wells, GF, H, Criddle, CS, and Francis, CA : Occurrence of ammonia-oxidizing archaea in wastewater treatment plant bioreactors. Appl. Environ. Microbiol., 72:5643~5647, 2006.
9. Anderson, IC, Poth, M, Homstead, J and Gurdige, D : A comparison of NO and N₂O production by the autotrophic nitrifier *Nitrosomonas europaea* and the heterotrophic nitrifier *Alcaligenes faecalis*.

- Appl. Environ. Microbiol., 59:3525~3533, 1993.
10. Liu, Y and Capdeville, B : Kinetic behaviors of nitrifying biofilm growth in wastewater nitrification. Environ. Technol., 15:1001~1013, 1994.
 11. Zhonghua, H, Phillip, BG and Betty, HO : Distribution of Nitrobacter and Nitrospira Communities in an Aerobic Activated Sludge Bioreactor and their Contributions to Nitrite Oxidation. Water Environment Federation, p.2390~2403, 2010.
 12. Limpiyakorn, T, Shinohara, Y, Kurisu F and Yagi, O : Communities of ammonia-oxidizing bacteria in activated sludge of various sewage treatment plants in Tokyo. FEMS Microbiol Ecol., 54:205~217, 2005.
 13. John, CH and Robert, JF : Nitrification in BOD₅ test increases POTW noncompliance. J. WPCF, 55(12):1461~1469, 1983.
 14. U. S. EPA. NPDES permit writers' manual. 2010.
 15. Water quality in the European Union: Council Directive of 21 May 1991 concerning urban wastewater treatment (91.271/EEC). 1991.
 16. 정동환, 최인철, 조양석, 정현미, 권오상, 유순주, 염익태, 손대회 : 우리나라 공공하수처리시설의 방류수 수질 관리체계 개선방안 고찰. Journal of Environmental Impact Assessment, 23:296~314, 2014.
 17. 신기식, 김용석 : 국민신문고 민원(하수처리장의 NBOD관련)에 대한 답변. 국립환경과학원, p.1~2, 2013.
 18. 신기식, 김용석 : 국민신문고 민원(질산화 억제제를 사용한 CBOD 적용)에 대한 답변. 국립환경과학원, p.1~2, 2013.
 19. 안태웅, 손대회, 김원기, 강주형, 이두현, 염익태, 박상민, 유순주 : 우리나라와 선진국간의 하수처리시설 수질기준에 관한 고찰. 783~787, 2013.
 20. 민경우, 정원삼, 이대행, 서광엽, 김승호, 배계진, 문용운 : 하수처리 방류수 BOD₅ 중 NOD 기여율에 관한 연구. 한국환경분석학회지, 14(1):12~19, 2011.
 21. Booker, W, Cecil, LH, David RZ, Rao, KC and Alan, WO : Exertion of 5-day nitrogenous oxygen demand in nitrifying wastewaters. J. WPCF, 55(9):1196~1200, 1983.
 22. 손수민 : 하수 유입/유출수, 하천수, 호소수의 유기물 성장 특성 연구. 한양대학교 석사학위논문, p.1~54, 2009.
 23. 강지호 : 하수처리장 방류수 BOD 중 NOD가 차지하는 비율에 관한 연구. 서울시립대학교 석사학위논문, p.1~62, 2009.
 24. Takakon, S, Hajime, H, Minoru, K, Takashi, A and Isamu, T : The amount of nitrogenous oxygen demand(NOD) in BOD. J. UOEH, 12(4):449~455, 1990.
 25. Jiang Deal, Tang Yida, Yuyang Gong, Ahang Jianrong and Sun Yicheng : Factors affecting the relationship between the NBOD values and the amount of nitrogenous pollutants: A field study on the Lee river. Water research, 25(4):485~489, 1991.
 26. Albertson, OE : Is CBOD₅ test viable for raw and settled wastewater?, Journal of Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers, 121:515~520, 1995.
 27. Winogradsky, S : Nitrofyng organism. In T. Brock(ed) Milestones in Microbiology Washington, D. C. : American Society for Microbiology. 1961.
 28. 서희정, 강영주, 민경우, 이경석, 서광엽, 김승호, 배계진, 김성준 : 하천수와 하수처리장 방류수의 유기물 분포 및 분해 특성. Analytical Science & Technology, 23(1):

- 36~44, 2010.
29. 정동환, 최인철, 조양석, 안경희, 정현미, 권오상, 박후원, 신현상, 허진 : 우리나라 공공하수처리시설의 TOC 배출특성 및 관리방안 연구. J. of Korean Society of Water and Wastewater, 28(6):657~668, 2014.
 30. 성진욱, 박제철 : 낙동강 수계 내 하수처리 방류수가 하류 하천 유기물에 미치는 영향: 부하량 비교. Korean J. Limnol., 45(2):210~217, 2012.
 31. 최지용, 한대호 : 유기물 수질지표로서 TOC 환경기준 설정에 관한 연구. 서울시연구, 12(3):173~184, 2011.
 32. 김재구, 신명선, 장창원, 정성민, 김범철 : 한강수계 주요하천과 호수내 TOC와 DOC분포 및 BOD와 COD의 산화율 비교. J. of Korean Society on Water Quality, 23(1):72~80, 2007.