

유입하수 유기물 분류 및 공정모사를 통한 하수처리공정 진단 I : 유입하수 유기물 분류

Diagnosis of Wastewater Treatment Processes through the Wastewater COD Fractionation and Process Simulation I: Wastewater COD Fractionation

최영균^{1,*} · 정태학²

Choi, Young-Gyun^{1,*} · Chung, Tai-Hak²

1 대구대학교 환경공학과

2 서울대학교 지구환경시스템공학부

(2007년 1월 5일 논문 접수: 2007년 9월 21일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The simulation programs used for diagnosis and design of activated sludge process require organic fractions in municipal wastewater as the input variables. However, methods for characterizing organic fractions are still under development, and are not standardized. In this study, total COD of municipal wastewater was experimentally subdivided into readily and slowly biodegradable COD as well as soluble and particulate inert COD. The COD fractionation of the three municipal wastewater for one year shows linear relationship between each COD fraction and TCOD concentration with around 100% COD balance. This result means that the COD fraction do not vary very much with time, although the actual influent concentrations vary significantly with time and day. Therefore, the experimentally subdivided COD fractions can be utilized as wastewater specific parameters for the simulation of activated sludge processes.

Key words: Biodegradability, COD balance, Organic fractionation

주제어: 생분해도, COD balance, 유기물 분류

1. 서론

최근 들어 기존 하수처리장의 보수나 개선사업의 일환으로 하수처리장 고도화 사업이 진행 중이거나 계획 중에 있는 곳이 많다. 이러한 고도화 사업에는 생물학적 질소·인 제거 공정이 포함되기 때문에 과거

에 사용되던 설계 방법으로는 생물학적 고도처리공정의 정확한 설계와 진단이 불가능하게 되었다. 따라서 최근에는 상용화된 하수처리 공정모사 프로그램을 이용하여 공정을 진단하고 처리수질을 예측하는 것이 보편화되었다. 하수처리 공정 모사를 위해 상용화되어 있는 프로그램으로는 GPS-X, WEST, AQUASIM, BioWin 등이 있으며, 대부분의 프로그램

*Corresponding author Tel: +82-53-850-6692, FAX: +82-53-850-6699, E-mail: choiyg@daegu.ac.kr (Choi, Y.G.)

Table 1. Composition of the influent wastewater(average value)

Plant \ Item	BOD ₅ (mg/L)	S _s (mg/L)	COD _{Cr} (mg/L)	TN (mgN/L)	TP (mgP/L)	NH ₄ ⁺ -N (mgN/L)	PO ₄ ³⁻ -P (mgP/L)
A	102.3	111.0	217.3	27.2	4.1	17.4	3.6
B	42.7	46.0	70.3	33.0	3.6	19.6	3.3
C	112.8	108.6	228.7	30.2	3.4	19.0	3.0

에서 ASM(Activated Sludge Model)을 기본 모델로 채택하고 있다(Hydromantis, 2002; Hemmis, 2003).

ASM은 활성슬러지를 이용한 유기물 제거 및 질소·인제거의 모델링을 위해 하수중의 유기물을 S_s(readily biodegradable COD), X_s(slowly biodegradable COD), S_i(soluble inert COD) 및 X_i(particulate inert COD)로 분류하고 있으며, 경우에 따라 X_H(heterotrophic biomass)를 포함하여 분류하기도 한다. 그러나 X_H는 그 농도가 무시할 정도로 낮을 뿐만 아니라 X_s에 포함되기 때문에 하수의 유기물 분류 항목에서는 일반적으로 제외되는 경우가 많다(Henze 등, 2000). 따라서 ASM을 기본 모델로 사용하는 상용 프로그램의 효과적인 활용을 위해서는 유입하수의 유기물을 S_s, X_s, S_i, 그리고 X_i의 4가지 성분으로 분류한 뒤, 입력변수로 사용하는 것이 바람직하다(최 등, 2003; 김 등, 2004). 유기물 분류방법으로 호기나 무산소 상태에서 미생물의 호흡률을 연속식 또는 회분식으로 분석하는 다양한 방법이 소개되어 있지만, 국내의 경우 아직까지 일관성 있게 적용되는 방법은 없다. 상용화 프로그램에서는 유입하수를 구성하는 변수 입력 방법으로서 분류된 유기물 성분을 직접 입력하는 방법도 제공하지만, 아직까지는 BOD나 SS 등의 손쉽게 분석 가능한 항목을 이용하여 유입하수의 유기물 성분을 추정된 뒤 입력 자료로 사용하는 사례가 많다.

본 연구에서는 무산소 상태에서의 미생물 호흡률 분석과 호기 상태에서의 장기 회분실험을 통해 하수처리장 유입하수의 유기물 성분을 S_s, X_s, S_i와 X_i 성분으로 분류하였으며, 분류된 유기물 성분이 각 처리장별 하수의 특성을 일관성 있게 반영하는지를 검토하였다. 이를 통해 실증된 실험 자료를 공정모사 상용프로그램의 입력 변수로 사용하여 수질예측결과의 신뢰도를 향상시키고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 유입하수

본 연구에서는 인근에 위치한 하수종말처리장 3곳을 선정하여 각 처리장의 유입하수에 대해 유기물을 분류하였다. 선정된 하수종말처리장의 시설용량은 각각 40,000톤/일(A처리장), 10,000톤/일(B처리장), 47,000톤/일(C처리장)이며, A처리장은 2단 혐기-호기(AOAO) 공법을 생물학적 처리공정으로 채택하여 운전되고 있으며, B처리장은 표준활성슬러지 공법, C처리장은 혐기-무산소-호기(A₂O) 공법으로 운전되고 있다. 각 처리장별 유입하수의 기초 수질분석결과는 **Table 1**과 같다. A와 C처리장의 유입수는 모두 대도시에서 발생하는 하수이므로 국내의 도시하수 성상과 매우 유사한 특성을 나타내고 있다. 그러나 B처리장 유입하수의 경우에는 유기물농도가 낮고 질소와 인 농도가 상대적으로 매우 높아 도시하수의 성상과는 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 B처리장 유입수가 인근 과수농가에서 발생하는 하·폐수로 구성되어 비료함량이 높기 때문인 것으로 판단된다.

2.2. 무산소 상태에서 미생물 호흡률 분석

본 연구에서는 생분해가 가능한 성분인 S_s와 X_s를 NUR(nitrate uptake rate) 회분실험을 통해 분류하였다. NUR 분석 방법은 실험 결과의 해석과정에서 사용되는 경험적 계수가 Y_H 한 가지이기 때문에 OUR(oxygen uptake rate) 분석방법에 비해 결과의 계산 과정에서 발생할 수 있는 오차가 적은 큰 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 사용한 유입하수와 식중슬러지는 동일 처리장에서 채취하였으므로 따로 적응 기간을 두지 않았다. 단, B처리장의 슬러지는 표준활성슬러지 공법에서 채취된 슬러지였으므로 30일 이상 무산소-호기기간을 반복하며 동일 하수처리장의 유입하수에

적응하도록 실험실 규모 반응기에서 반회분식 방법으로 운전된 뒤 식중슬러지로 사용하였다. NUR 회분 실험의 초기 F/M비는 가급적 0.3으로 동일하게 맞추어 처리장별로 비교가 가능하도록 하였다. 기타 실험 조건은 Kujawa와 Klapwijk(1999)가 제시한 방법과 동일하게 하였다. NUR 회분실험은 각각의 유입하수에 대해 월평균 1회씩 1년여에 걸쳐 차-테스터기를 이용하여 실온에서 실시되었고 실험 초기조건은 NO₃-N 30mgN/L, 하수 부피 0.9~0.95L, 운전 부피 1.0L였다.

2.3. 호기 상태에서의 장기 회분 실험

일반적으로 활성슬러지 공정에서 생물학적으로 분해 불가능한 유기물의 종류는 S₁와 X₁ 두 가지로 구분된다(Eremektar 등, 1998; Henze 등, 2000). 생물학적 반응에는 전혀 관여하지 않음에도 불구하고 이러한 난분해성 COD 성분이 의미를 가지는 이유는 처리수질과 슬러지 발생량에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 유입수의 난분해성 유기물 성분을 독립적으로 분석함으로써 NUR 회분 실험을 통해 분석된 생분해 가능한 유기물 성분과 더불어 유입수 TCOD에 대한 물질수지를 확인할 수 있다는 점에 보다 큰 의미를 두었다.

본 연구에서는 유입하수에 포함된 난분해성 유기물 성분을 분석하고자 Eremektar 등(1998)과 Germirli 등(1998)이 제시한 호기성 장기 회분실험 방법을 채택하였다. 연구기간동안 장기회분실험은 각 처리장의 유입하수별로 총 5회에 걸쳐 실시되었고 각각의 하수 시료마다 2개의 회분식 반응조가 사용되었다. Reactor#1에는 여과되지 않은 하수가 기질로 사용되었고, Reactor#2에는 GF/C filter를 이용하여 여과된 하수가 기질로 사용되었다. 장기 회분실험은 반응조의 TCOD 변화가 5% 미만으로 유지될 때까지 지속하였으며, 이 상태에서는 활동도가 있는 세포가 전혀 없는 것으로 알려져 있다(Orhon 등, 1989; Eremektar 등, 1998).

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 생분해 가능한 유기물 분류

처리장별 유입하수에 포함된 생분해 가능한 유기

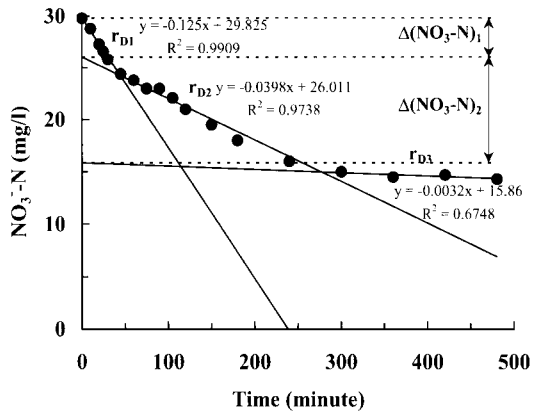


Fig. 1. Nitrate concentration in the NUR batch test performed with the wastewater of plant A.

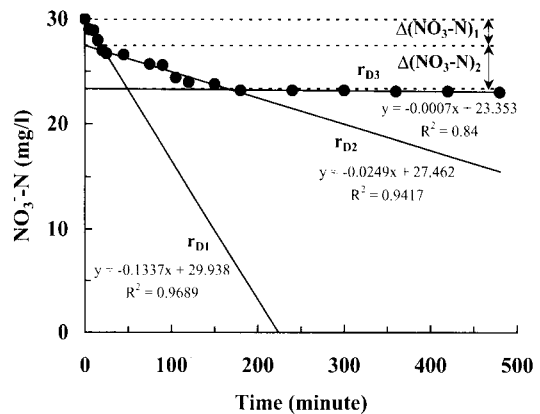


Fig. 2. Nitrate concentration in the NUR batch test performed with the wastewater of plant B.

물은 S₅와 X₅ 성분의 합이며, 본 연구에서는 각 성분을 NUR 분석을 통해 정량하였다. 2005년 4월~2006년 1월 동안 총 10회에 걸쳐 실시된 유입하수 유기물 분류결과, COD balance가 가장 양호한 것으로 나타난 2005년 5월의 분석결과를 Fig. 1~Fig. 3에 제시하였다.

NUR 회분실험 결과로부터 S₅와 X₅ 농도는 각각 $2.86 \cdot \Delta(\text{NO}_3\text{-N})_1 / (1 - Y_{\text{H}})$ 와 $2.86 \cdot \Delta(\text{NO}_3\text{-N})_2 / (1 - Y_{\text{H}})$ 에 의해 계산 가능하다(Kujawa와 Klapwijk, 1999; Henze 등, 2000). 여기서 2.86은 질산성 질소의 전자 수용체 용량계수 (electron acceptor capacity, mgCOD/mgN)를 나타내고 Y_H는 종속영양미생물의 수율 (heterotrophic yield coefficient)로서 도시하수처리

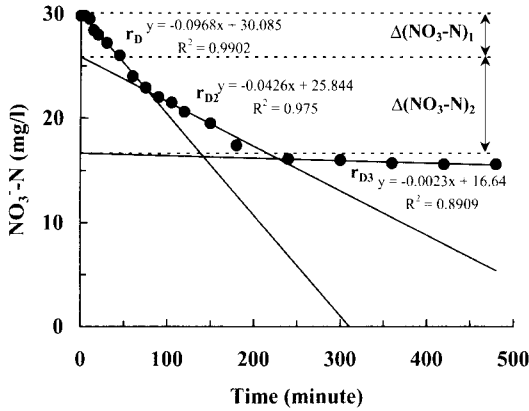


Fig. 3. Nitrate concentration in the NUR batch test performed with the wastewater of plant C.

장 활성슬러지의 대푯값으로 많이 사용되는 0.67을 적용하였다(Ekama 등, 1986). 이러한 방법으로 계산된 A, B, C처리장 유입하수의 S_5 농도는 각각 36.7, 22.6, 40.8mg/L였고, X_5 농도는 각각 97.8, 37.5, 88.6mg/L였다. 본 연구에서 선정된 하수처리장 유입하수의 경우 X_5 의 농도가 S_5 에 비해 상당히 높게 나타났다, 유입 TCOD의 41~60%를 차지하는 것으로 분석되었다. 이는 Henze 등(2000)이 제시한 전형적인 도시하수의 X_5 비율이 TCOD 농도의 30~60%라는 조사 결과와도 잘 일치한다.

3.2. 생분해 불가능한 유기물 분류

생분해 불가능한 유기물은 S_1 와 X_1 의 두 가지 분율로 구분된다. 생분해 불가능한 유기물의 분석을 위해 수행된 장기회분실험은 연구기간 중 총 5회였으며, 그 중 COD balance가 가장 양호한 것으로 나타난 2005년 5월의 분석결과를 Fig. 4~Fig. 6에 제시하였다.

Fig. 4~Fig. 6의 실험결과로부터 S_1 와 X_1 는 Eremektar 등(1998)과 Germirli 등(1998)이 제시한 과정에 의거하여 식 (1)과 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$X_1 = (C_{T1} - S_{T1}) - (C_{T2} - S_{T2}) \cdot \frac{\Delta C_{T1}}{\Delta C_{T2}} \quad (1)$$

$$S_1 = S_{T1} - \frac{S_{T1} - S_{T2}}{1 - \frac{\Delta C_{T1}}{\Delta C_{T2}}} \quad (2)$$

여기서, C_T : 실험 종료 시점에서 TCOD 농도
 S_T : 실험 종료 시점에서 SCOD 농도
 ΔC_T : 실험 시작 및 종료 시점의 TCOD 농도 차이
 1, 2: Reactor#1, Reactor#2

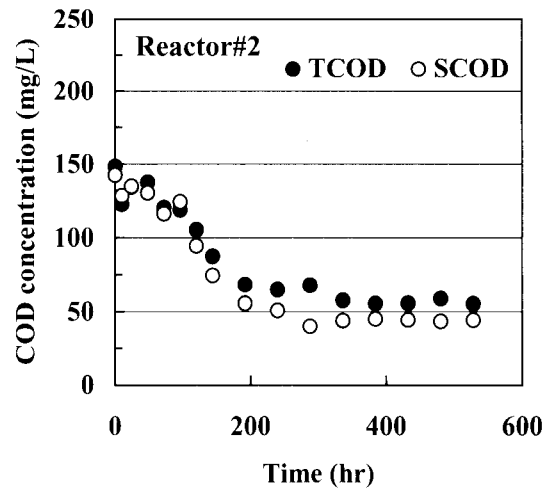
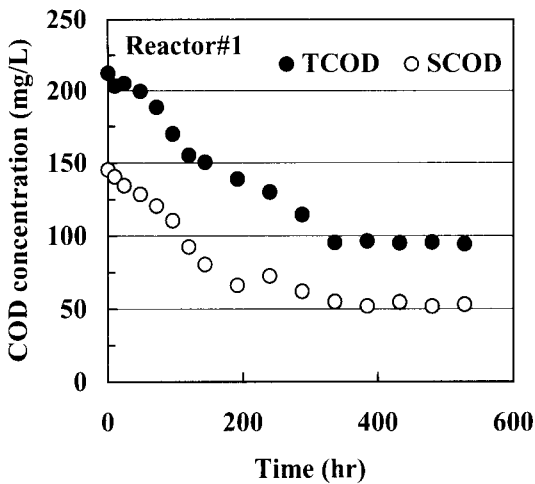


Fig. 4. COD concentration in the long-term batch test performed with the wastewater of plant A(Reactor#1: with unfiltered wastewater, Reactor#2: with filtered wastewater).

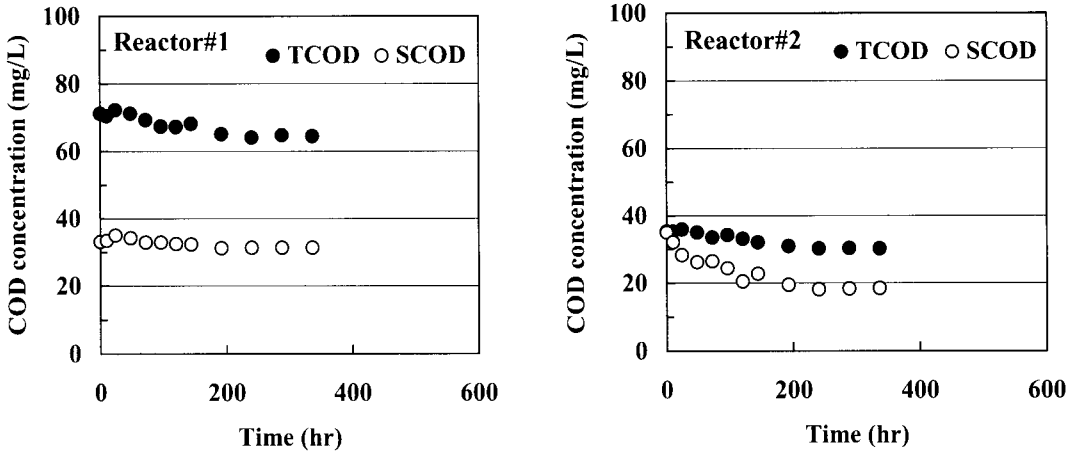


Fig. 5. COD concentration in the long-term batch test performed with the wastewater of plant B.

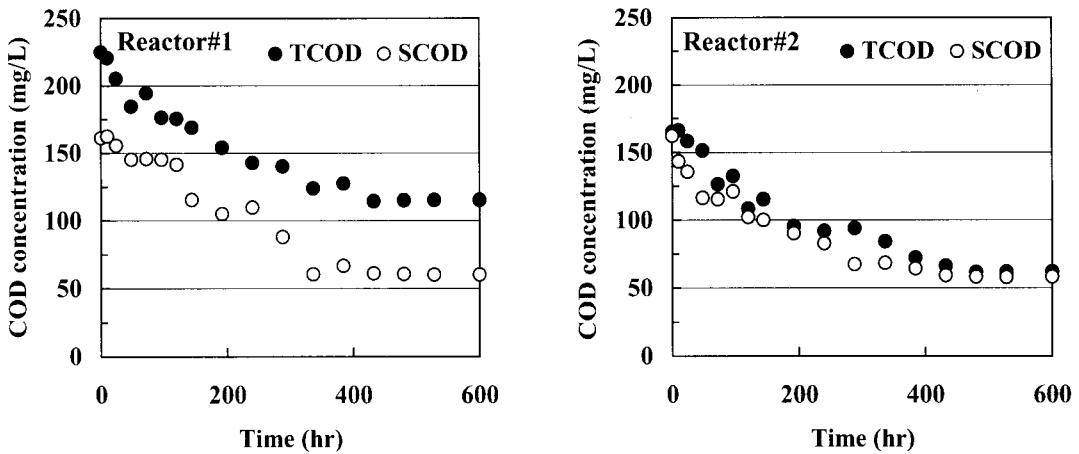


Fig. 6. COD concentration in the long-term batch test performed with the wastewater of plant C.

식 (1)과 (2)의 특징은 생분해 불가능한 COD 성분을 경험적인 계수 없이 실험적으로 구할 수 있다는 점이다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 Fig. 4로부터 구한 A처리장 유입하수의 X_1 와 S_1 농도는 각각 26.7과 15.7mg/L로 나타났다. 마찬가지로 Fig. 5로부터 B처리장의 X_1 와 S_1 농도는 각각 5.8과 8.6mg/L, C처리장의 X_1 와 S_1 농도는 각각 50.9과 40.5mg/L로 분석되었다.

3.3. COD balance

3.1과 3.2절에서 제시한 생분해 가능한 유기물 농도와 생분해 불가능한 유기물 농도를 Table 2에 COD balance와 함께 제시하였다. 각 하수처리장 유

입하수의 COD balance 조사결과, 유입 TCOD 대비 $S_s + X_s + S_1 + X_1$ 의 값이 96%(A처리장), 119%(B처리장), 103%(C처리장)에 해당하는 것으로 나타나, 실험결과에 대한 신뢰도를 확인할 수 있었다. 이와 같은 COD balance는 장기회분실험이 수행된 총 5회의 실험에서 비슷한 수준을 유지하는 것으로 나타났다. 다만 B처리장의 경우에는 분류된 COD 합이 TCOD의 112~128%에 이르는 것으로 나타나 비교적 오차가 크게 나타났다. 이는 B처리장의 유입 TCOD가 다른 처리장의 30~40% 밖에 되지 않아 Fig. 5에서도 확인할 수 있듯이 정확한 실험 결과를 얻기가 어려웠기 때문이다.

Table 2. Summary of the wastewater COD fractionation(Sampling time: May 12, 2005)

Plant \ Item	TCOD (mg/L)	SS (mg/L)	X _S (mg/L)	S ₁ (mg/L)	X _I (mg/L)	COD balance(%)*
A	185.3	36.7	97.8	15.7	26.7	96
B	62.5	22.6	37.5	8.6	5.8	119
C	214.0	40.8	88.6	40.5	50.9	103

* COD balance = (S_S + X_S + S₁ + X_I) 100/TCOD

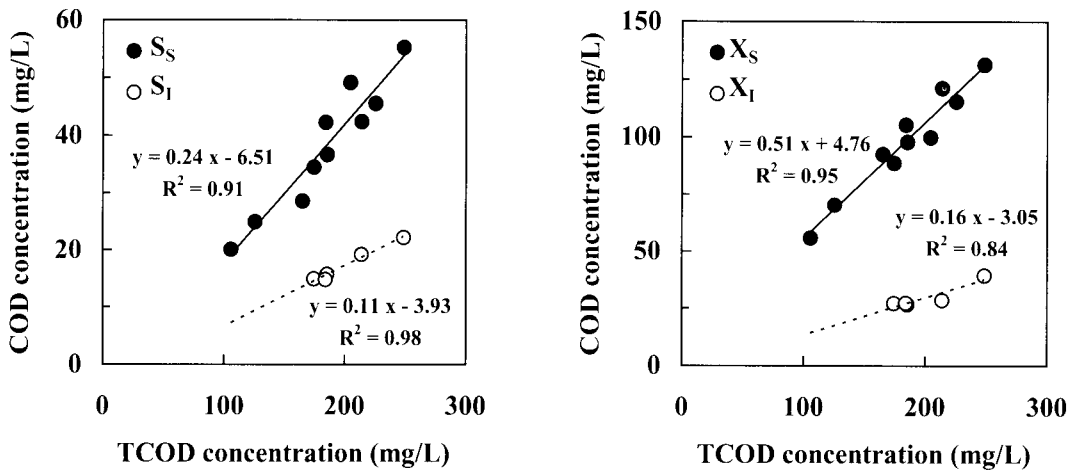


Fig. 7. Relationship between each COD fraction and TCOD of the influent wastewater (plant A).

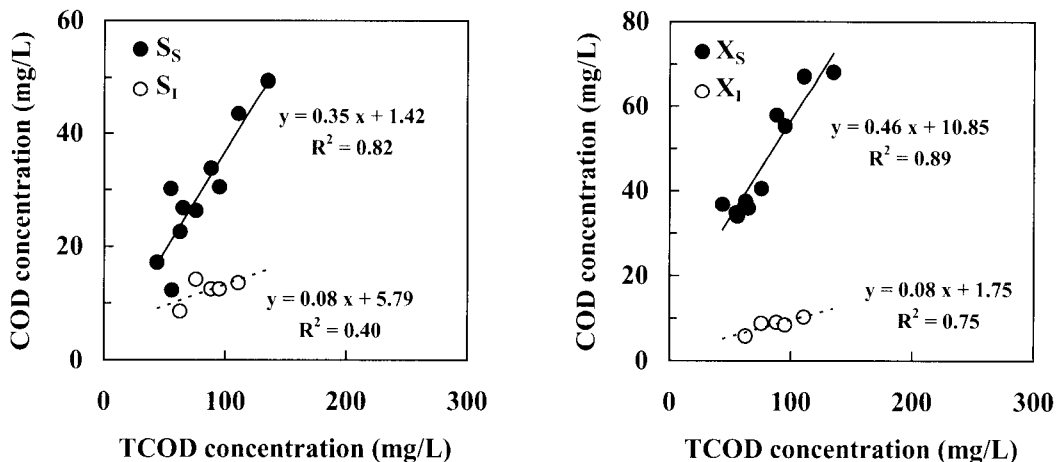


Fig. 8. Relationship between each COD fraction and TCOD of the influent wastewater (plant B).

3. 4. 유기물 분류 결과 정리

2005년 5월에 수행된 분석결과를 포함하여 2005년 4월~2006년 1월까지 수행된 총 10회의 NUR 분석 결과 및 5회의 장기회분실험결과와 TCOD 농도와의 상관관계를 **Fig. 7~Fig. 9**에 제시하였다. 분석결과 RBCOD인 S_S와 SBCOD인 X_S 성분은 유입하수의

TCOD와 비교적 높은 선형관계를 나타내었다. 그러나 용해성 생분해 불가능한 COD 성분인 S₁와 입자상 생분해 불가능한 COD 성분인 X_I는 비교적 선형관계가 낮은 것으로 나타났다.

앞서 설명하였듯이 하수 중의 난분해성 COD 성분의 분석에는 경험적인 계수가 전혀 사용되지 않는다.

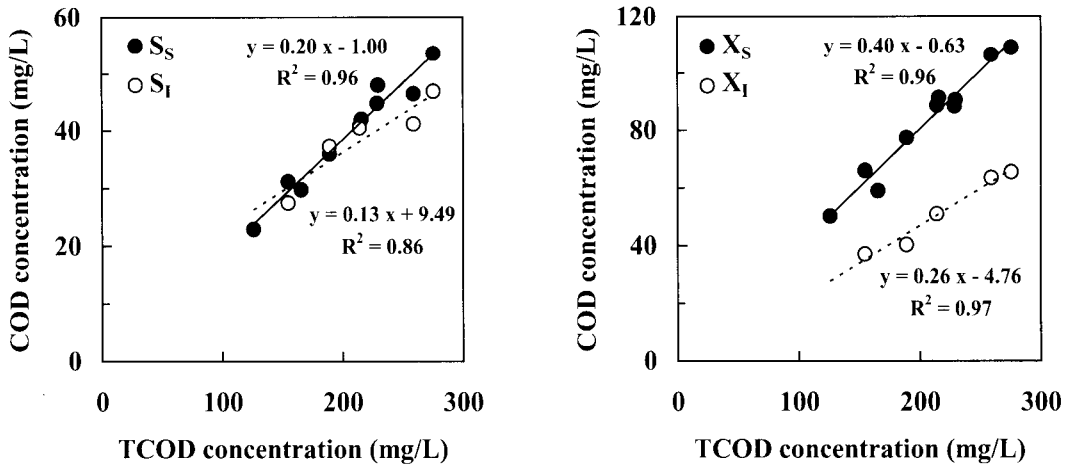


Fig. 9. Relationship between each COD fraction and TCOD of the influent wastewater (plant C).

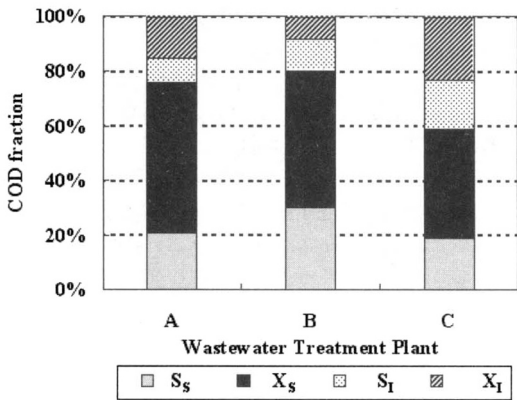


Fig. 10. Summary of the wastewater COD fractionation (May 2005-Jan. 2006).

따라서 실험결과와 오차를 최소화 할 수 있다면 공정 모사에 필요한 매우 중요한 두 가지 입력변수(S_f 와 X_i)를 얻을 수 있다.

Fig. 7 ~ Fig. 9의 분석결과를 바탕으로 유입 TCOD에 대한 각 COD 분율의 비율을 정리하면 Fig. 10과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 10에 제시한 각 COD 분율의 비율은 TCOD 상관관계도 그래프의 기울기가 된다. 즉, 이 기울기의 의미는 유입하수 TCOD 1g 당 각각의 COD 성분이 차지하는 분율이 된다. 분석 결과, 우선 COD recovery가 모두 100% 내외라는 점이 두드러진다. 즉, 각 COD 성분에 대한 통계 분석결과 및 실험결과에 대한 신뢰도가 매우 높다고 할 수 있다. 각 성분별로는 세 곳의 처리

장 모두 X_s 성분이 가장 높은 것으로 나타났고, S_f 성분이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 또한 Fig. 10의 누적분포도에서도 파악할 수 있듯이, 생분해도 측면에서는 B처리장의 유입하수가 가장 유리할 것으로 조사되었고, A처리장과 C처리장 순으로 생분해도가 높게 평가되었다. 또한 C처리장의 경우에는 S_f 성분의 비율이 가장 높은 것으로 조사되어 COD의 제거 효율 측면에서 가장 불리할 것으로 평가되었다. 실제로 장기회분실험 결과, C처리장의 S_f 농도는 27.5 ~ 46.9mg/L로 조사되어 다른 처리장에 비해 2배 이상 높은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 하수처리시설의 진단 및 운전효율 예측을 위한 공정모사에서 입력변수로 사용되는 유입하수의 유기물 분율을 실험적으로 분류하고자 수행되었다. 1년 동안의 NUR 분석과 장기회분실험을 통해 S_s , X_s , S_f , X_i 의 네 가지 하수 COD 구성성분을 체계적으로 분류할 수 있었으며, 각 처리장의 공정모사를 위한 입력변수로 활용가치가 매우 높다는 것을 확인할 수 있었다.

세 곳의 하수처리장 유입하수에 대한 유기물 분석 결과, 4가지의 유기물 성분과 유입 TCOD 농도 간에 선형관계가 성립되는 것을 확인하였다. 특히, 분석자료의 개수가 충분하였던 S_s 와 X_s 성분은 비교적 정확한 선형관계를 나타내는 것으로 분석되었다. 본 연구

에서 분석한 하수처리장 유입하수의 경우, 생분해 가능한 성분이 59~80%를 차지하는 것으로 조사되었고, 특히 X_s 의 경우 유입 TCOD의 40~55%에 해당되어 하수의 생분해도 평가에 매우 중요한 의미를 갖는 변수인 것으로 확인되었다. 2005년 4월~2006년 1월에 걸쳐 수행된 유기물 분류 결과의 통계적 해석을 통해, 각 처리장 별로 약간씩 차이는 발생하였지만 100% 내외의 매우 정확한 COD balance를 얻을 수 있어 실험결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 따라서 유입하수 COD의 네 가지 성분인 S_s , X_s , S_i 와 X_i 를 하수처리장 별로 분류할 경우, 고유한 입력변수로서 공정설계와 진단에 매우 유용하게 사용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 경북환경기술개발센터의 2005년도 연구 개발사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김동한, 김희준, 정태학 (2004) 호흡률법에 의한 하수의 생분해 특성 평가: I. 호흡률법, *상하수도학회지*, **18**(1), pp. 29-36.
2. 최영균, 김규동, 김희준, 김윤중, 정태학 (2003) 미생물 호흡률 분석에 의한 하수의 유기물 분류, *상하수도학회지*, **17**(4), pp. 503-509.
3. Ekama, G.A., Dold, P.L. and Marais, G.v.R. (1986) Procedures for determining influent COD fractions and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems, *Wat. Sci. Tech.*, **18**, pp. 91-114.
4. Eremektar, G., Babuna, F.D. and Orhon, D. (1998) Inert COD fractions in two-stage treatment of a pulp and paper mill effluent, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **72**, pp. 7-14.
5. Germirli, F., Ince, O., Orhon, D. and Simsek, A. (1998) Assessment of inert COD in pulp and paper mill wastewater under anaerobic conditions, *Wat. Res.*, **32**(11), pp. 3490-3494.
6. Hydromantis, Inc. (2002) *GPS-X 4.1.2: User's Guide and Technical Reference*. Hydromantis, Inc., Hamilton, Ontario, Canada.
7. Hemmis N.V. (2003) *WEST Tutorial and Models Guide*. Hemmis, Inc., Kortrijk, Belgium.
8. Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M. (2000) *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Publishing, London, England.
9. Kujawa, K. and Klapwijk, B. (1999) A method to estimate denitrification potential for predenitrification systems using NUR batch test, *Wat. Res.*, **33**(10), pp. 2291-2300.
10. Orhon, D., Artan, N. and Cimsit, Y. (1989) The concept of soluble residual product formation in the modelling of activated sludge, *Wat. Sci. Tech.*, **21**(4-5), pp. 339-350.