

슬러지 침전성이 DNR 공정에 미치는 영향 평가

The Effect of Sludge Settleability on the Performance of DNR Process

서창원¹ · 란 티 뉴엔² · 정형석¹ · 이상민³ · 이의신⁴ · 신항식^{1,*}

Chang-Won, Suh¹ · Lan Thi Nguyen² · Hyeong-Seok, Jeong¹ · Sang-Min, Lee³ · Eui-Sin, Lee⁴ · Hang-Sik, Shin^{1,*}

1 한국과학기술원 건설 및 환경공학과

2 NACENTECH, Viet Nam

3 공주대학교 환경공학과

4 대우건설기술연구소 환경연구팀

(2006년 1월 20일 논문 접수; 2006년 4월 10일 최종 수정논문 채택)

Abstract

The sludge settleability is a key factor for operating activated sludge process as well as BNR (biological nutrient removal) process, because the poor sludge settling causes an increase of suspended solid in the effluent. In order to improving the sludge settleability, a settling agent such as iron dust can be applied. In this study, the effect of sludge settleability on the performance of DNR (Daewoo nutrient removal) process was investigated with GPS-X, which is the popular wastewater treatment process model program, and the result of modeling was verified with operating lab-scale DNR process. As a result, if the sludge blanket keeps stable in the secondary settling tank, the effluent quality is similar in spite of different SVI values. And in case of the good sludge settleability, short HRT or long SRT increased the biomass concentration in the bioreactor, and improved the pollutant removal efficiency. In spite of daily influent changing, the good sludge settleability also guaranteed the stable effluent quality. And the results of the lab-scale DNR process experiment could support the simulated results.

Key words: sludge settleability, SVI, GPS-X, DNR, wastewater treatment model

주제어: 슬러지 침전성, SVI, GPS-X, DNR, 하수처리장 모델

1. 서 론

현재 국내에 운영중인 대부분의 하수처리장은 표준활성슬러지 공법과 같은 부유성 생물학적 처리공법

을 사용하고 있다. 본 공법은 생물학적 처리 후 말단에 슬러지와 처리수를 분리하기 위한 최종침전지를 필요로 한다. 하지만 유입 유량의 증가나 슬러지 벌킹과 같은 슬러지 침전성 저하로 고형물이 유출되어 처리수질이 악화되는 문제가 종종 발생한다. 이와 같

*Corresponding author Tel: +82-42-969-3653, FAX: +82-42-969-3610, E-mail: hangshin@kaist.ac.kr (Shin, H.S.)

이 최종침전조의 슬러지 침전성 저하 문제는 하수처리장 운전자들이 겪는 가장 큰 문제점 중에 하나이다.

슬러지 침전성 문제를 해결하기 위해서는 슬러지 벌킹과 같이 미생물 특성에 관한 것으로 문제를 해결하기 위해 선택조를 운전하는 방법도 있지만 슬러지 침전 보조제를 주입하여 슬러지 침전성을 증가시키는 방법도 있다(Sakai, 1991). 슬러지 침전 보조제로 비중이 매우 큰 철가루를 사용할 수 있으며 슬러지 침전성 인자인 SVI(Sludge volume index)가 50%정도까지 감소할 수 있는 것으로 나타났다(Nguyen, et al., 2005). 본 연구에서는 이와 같이 슬러지 보조제를 이용하여 슬러지 침전성이 증가하였을 경우 DNR 반응기에 미치는 영향을 하폐수 처리시설 모델 프로그램인 GPS-X(ver. 4.12)를 이용하여 모델링 하였고, iron dust를 사용한 lab-scale DNR 반응기 운전결과로 모델링 결과를 확인하는 연구를 수행하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. Lab-scale DNR(Daewoo Nutrients Removal) 반응기 구성 및 운전조건

실험에 사용한 lab-scale DNR 반응기의 구성은 일

차침전조 없이 생물학적 반응조와 최종침전조로 이루어져 있으며, 생물학적 반응조는 최종침전조에서 반송된 슬러지 내 질산염을 탈질시키기 위한 전탈질조와 인방출을 위한 혐기조 및 탈질을 위한 무산소조, 질산화를 위한 호기조로 구성되어 있다(Fig. 1). Lab-scale DNR 반응기의 생물학적 반응조의 크기는 20L(전탈질조 1.5L, 혐기조 3.5L, 무산소조 5L, 호기조 10L)이며 최종침전조는 직경이 19cm인 원형침전조로 부피는 5.3L였다.

Lab-scale DNR 반응기 운전에 사용한 유입수는 실험실에서 제조한 합성하수를 사용하였으며, 유기물, 질소, 인은 각각 $\text{CH}_3\text{COONa} + \text{Glucose}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KH_2PO_4 를 이용하여 조절하였다. 실험에 사용된 COD, 암모니아 및 인산염의 농도는 각각 200mg COD/L, 40mg $\text{NH}_4^+ - \text{N/L}$, 5mg $\text{PO}_4^{3-} - \text{P/L}$ 이었다. 이외에 NaHCO_3 를 이용하여 유입수의 알카리도를 350mg CaCO_3/L 로 조절하였다. 반응기 운전 조건은 HRT의 경우 8h과 6h으로 운전하였으며(침전조 제외), SRT는 약 20d와 40d로 운전하였다. 내부반송은 유입 유량의 150%로 고정하였으며, 반송슬러지 유량은 50%와 100%로 운전하였다. 식중 미생물로 DNR 공법을 사용하고 있는 C시 고도하수처리장 반송슬러지를 사용하였다. Iron dust의 주입에 따른 영향을 비

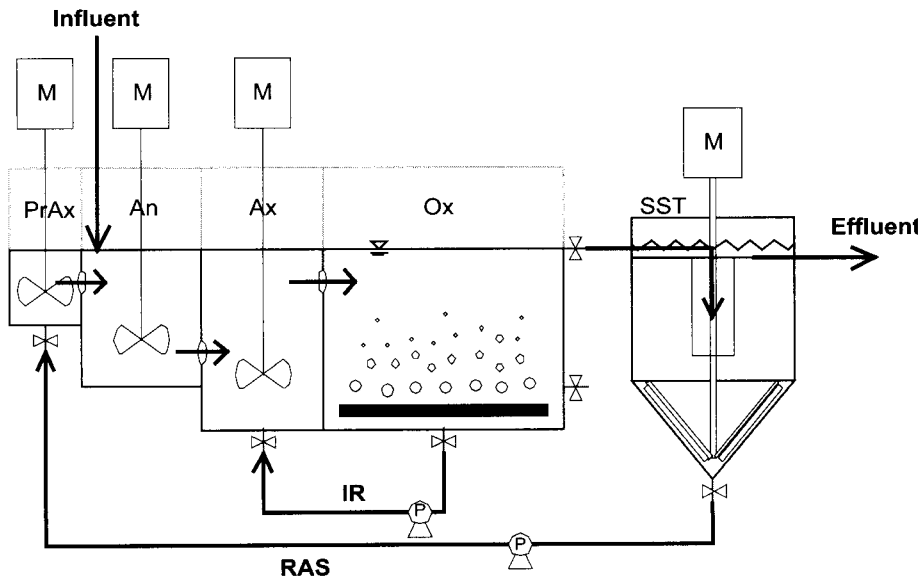


Fig. 1. The schematic diagram of DNR process(PrAx: 전탈질조, An:혐기조, Ax: 무산소조, Ox:호기조, SST: 이차침전조, IR: 내부반송, RAS: 슬러지반송).

교하기 위해서 같은 크기의 lab-scale DNR 반응기를 2개 운전하였으며, 한 반응기에만 iron dust를 주입하였다. Iron dust는 하루에 폐기되는 MLVSS를 기준으로 0.5g iron dust/g MLVSS 만큼 호기조에 주입하였으며, 500번체(눈금크기 25 μ m)로 iron dust를 걸러서 부상할 수 있는 작은 입자의 iron dust만을 사용하였다. 본 논문에서 Iron dust를 주입한 반응기와 주입하지 않은 반응기를 구분하기 위하여 각각의 반응기에 대한 약자로 WID(with iron dust)와 WOID(without iron dust)를 사용하였다.

2.2. DNR 반응기 모델 조건

DNR 반응기를 모델링하기 위해서 Hydromatics에서 개발된 GPS-X 4.1.2를 사용하였다. 본 프로그램에 포함되어 있는 여러 모델 중 생물학적 반응조를 위해서는 ASM3를 사용하였으며 침전조 모델을 위해서는 생물학적 반응이 없는 simple1d 모델을 사용하였다. 모델 상수는 ASM3 보고서(Henze, 2000)에 나와 있는 상수값을 사용하였다.

모델링 대상 DNR 반응기의 구성은 본 연구에 사용된 lab-scale DNR 반응기와 같았으며, 생물학적 반응조의 부피는 667L(전탈질조 42L, 혐기조 125L, 무산소조 167L, 호기조 333L)이었으며, 최종침전조는 표면적이 0.2m², 높이가 1.25m인 원형 반응기로 구성하였다.

모델링에 사용된 유입수 조건은 K대학교에서 발생하는 하수조건을 참조하여 결정하였다(Chae, 2004). 그 결과 유입수의 TSS, BOD₅, TN 조건은 각각 113mg/L, 115mg/L, 45mg/L로 설정하였다. 내부반송률과 슬러지반송률은 lab-scale DNR 공정과 같이 유입유량을 기준으로 각각 150%와 50%이었으며, SRT 조절을 위해서는 폭기조에서 일정량의 슬러지를 폐기하는 방법을 사용하였다.

슬러지 침전성이 DNR 반응기에 미치는 영향을 평

가하기 위해서 6가지의 SVI 조건(60, 90, 120, 150, 180, 210mL/g)을 이용하여 4 가지의 상황을 모델링하였다. 자세한 모델링 상황은 Table 1에 정리하였다.

2.3. 분석 항목 및 방법

유기물은 COD_{cr}으로 측정하였으며, 측정방법은 standard method(APHA, 1998)의 5220C를 따랐다. 총 질소 농도는 합성하수를 사용하였기 때문에 암모니아와 질산염 농도를 측정하여 더했으면 각각의 측정방법은 standard method의 4500-NH₃ C와 이온크로마토그래피(DX-120, Dionex)를 사용하였다. 인산염도 질산염과 마찬가지로 이온크로마토그래피를 사용하여 측정하였으며 사용된 음이온 칼럼은 IonPac AS4A-SC이었다. 미생물 농도는 MLVSS로 측정하였으며, 측정방법은 위와 마찬가지로 standard method의 2540E를 따랐다.

3. 결과 및 고찰

3.1. DNR 반응기 모델 결과

3.1.1. HRT 및 SRT 영향 (모델링 상황 1, 2)

슬러지 침전성이 다른 경우 HRT 및 SRT의 변화에 따른 유출수 내 고형물 농도를 Fig. 2(a)에 나타내었다. HRT가 감소함에 따라, 즉 유입유량이 증가함에 따라서 슬러지 침전성이 나쁜 경우, 슬러지가 침전 분리되지 못하고 유출될 것을 예상할 수 있다. 하지만 최종침전조 내 슬러지 층이 최종침전조의 웨어 부분까지 차오르기 전까지는 비교적 안정된 유출수의 고형물 농도를 확인할 수 있다. Fig. 2에서 SVI가 180mL/g 이상인 경우는 모든 HRT 조건에서 슬러지 유출이 많은 것을 확인할 수 있지만, SVI 150mL/g 인 경우는 HRT 8h에서는 SVI 120mL/g 이하인 경우와 큰 차이가 없지만 HRT가 6h으로 감소하면 유출수 내 고형물 농도가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 최종침전조 내 높이별 고형물 농도가 HRT 6h에서 갑자기 증가하는 것으로 봐서 슬러지 층이 상승하기 때문이다. 이와 같은 현상을 더 자세히 알아보기 위해서 Fig. 3에 각각의 슬러지 침전성에 따라 HRT가 최종침전조 내 슬러지 농도 분포에 미치는 영향을 나타내었다.

Table 1. The events of DNR process simulation

Event	Changing condition	Other condition
1	HRT: 4, 6, 8h	SRT 22d
2	SRT: 16, 26, 78d	HRT 6h
3	Daily cycle influent rate & pollutant concentrations	SRT 22d, HRT 6h
4	Decreasing SVI	SRT 22d, HRT 6h

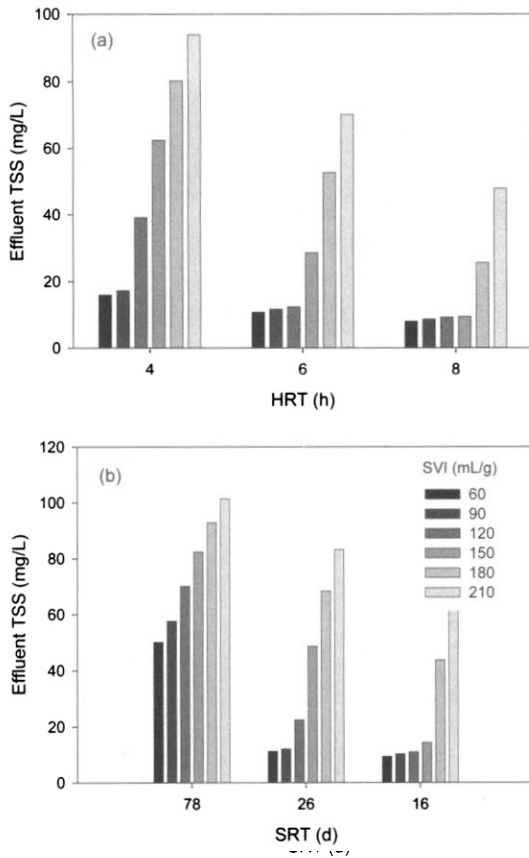


Fig. 2. TSS concentration in effluent according to HRT(a) and SRT(b)

SRT 변화에 따라 유출수 내 고형물 농도에 미치는 영향을 Fig. 2(b)에 나타내었다. HRT와 마찬가지로 최종침전조 내 슬러지 층이 안정하게 유지된다면 유출수의 고형물 농도도 슬러지 침전성에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다.

HRT의 감소는 유입수 유량의 증가로 인하여 반응기로 유입되는 오염물 부하가 증가하고, SRT의 증가는 반응조 내 미생물 농도가 증가한다. 이와 같은 현상이 질소 제거에 미치는 영향을 알아보기 위해서 HRT 및 SRT에 따른 유출수 내 질소의 농도를 유기성 질소, 암모니아성 질소 및 질산성 질소 농도로 나타내었다. 슬러지 침전성이 좋지 않아서 SVI 값이 높은 경우, 최종침전조에서 슬러지 유출로 인해 유기성 질소의 농도가 높은 것으로 나왔다. 그리고 슬러지 유출로 인해 반응조 내 미생물 농도의 감소로 질산화 효율이 떨어지고 따라서 유출수 내 암모니아 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상은 SRT 변화에서도 확인할 수 있었다. 따라서 HRT 및 SRT 변화에 따른 반응조 내 종속영양미생물 농도와 질산화 미생물 농도를 Fig. 5에 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 SVI가 큰 경우, 반응조 내 미생물 농도가 낮았다. 그리고 슬러지 침전성이 좋아서 슬러지 유출이 적은 경우 HRT가 감소함에 따라 즉, 오염물 부하가 증가함에 따라서 반응조 내 미생물 농도가

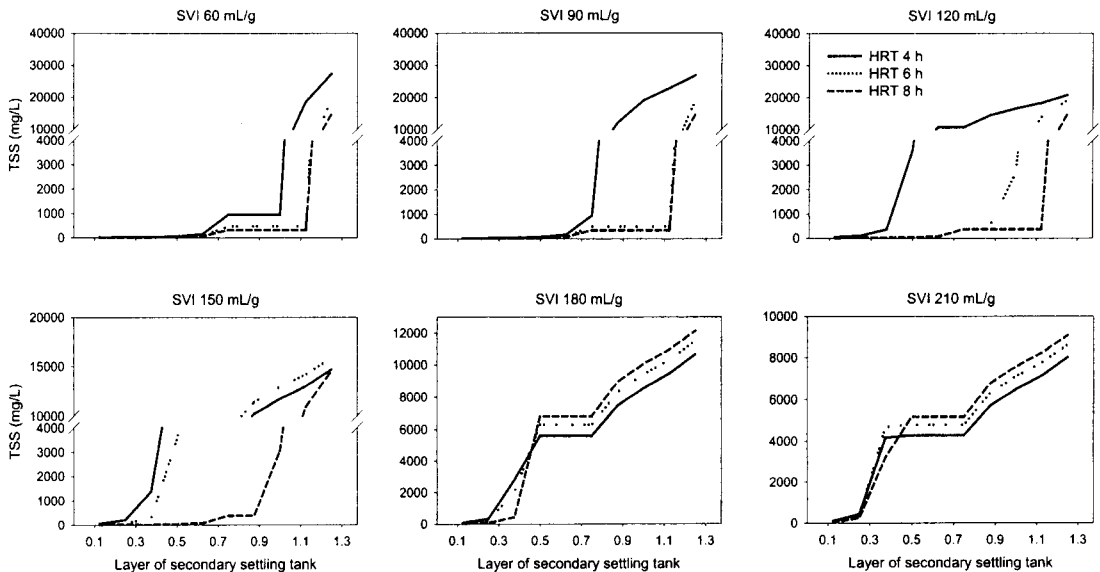


Fig. 3. The profile of TSS concentration in the secondary settling tank according to HRT

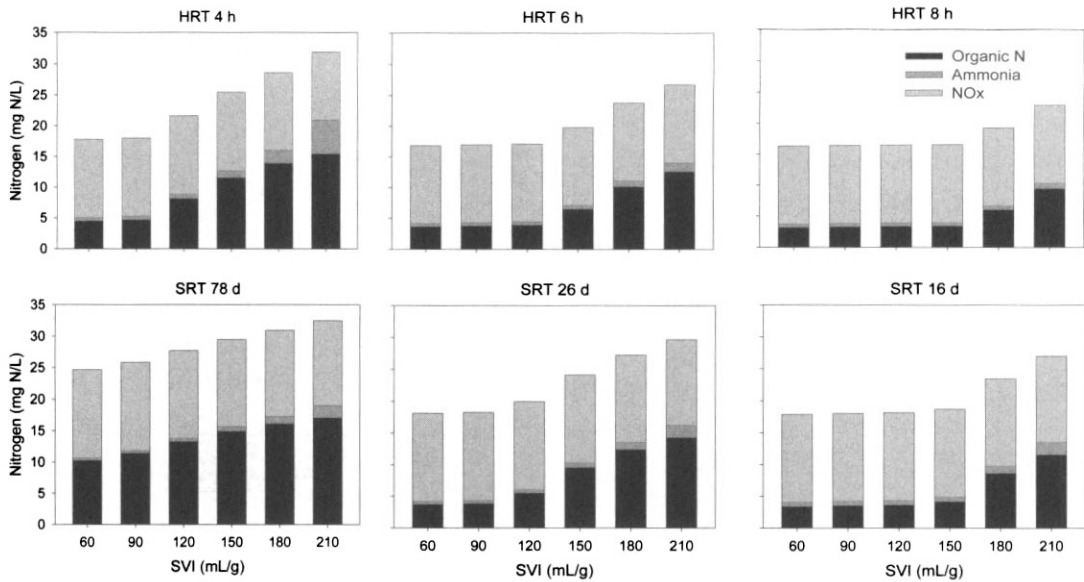


Fig. 4. Nitrogen concentrations in effluent according to HRT and SRT

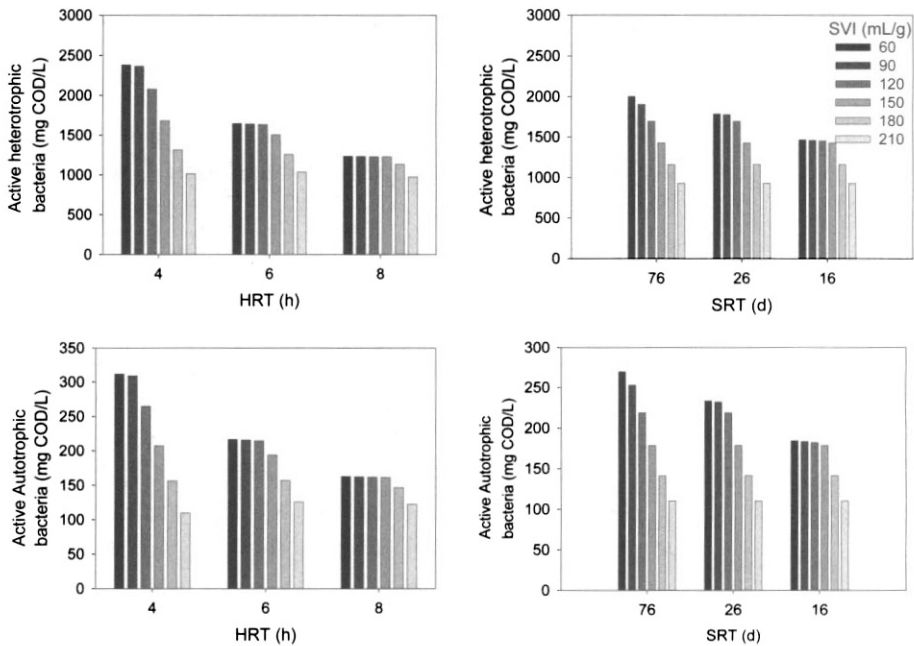


Fig. 5. Active heterotrophic and autotrophic bacteria concentrations in oxic tank.

증가하는 현상을 관찰할 수 있었다. 모델링 결과에 의해 슬러지 침전성이 좋은 경우, HRT를 낮게 운전하는 것이 반응조 내 미생물 농도를 높게 유지하기에

더 좋은 것으로 판단된다. 이외에 BOD5 농도는 TSS와 같은 경향을 나타내고 있었다.

3.2.2. 일일 유입 유량 및 오염물 농도 변화(모델링 상황 2)

실제 하수처리장에 유입되는 유입하수의 농도는 하루를 주기로 상당히 큰 폭으로 변한다. 물을 거의 사용하지 않는 새벽과 물을 많이 사용하는 저녁에는 유량 및 오염물 농도 차이가 2배 가까이 나는 경우도 많이 있다(정형석, 2005). 따라서 이와 같은 일일 유입 유량 및 오염물 농도의 변화가 DNR 반응기 처리 효율에 미치는 영향을 평가하였다. Fig. 6은 GPS-X에 설정된 값을 기초로 만든 하루 주기 유입수 유량 및 오염물 농도 변화를 나타내고 있다. 모델에 사용된 평균 유량(2.67m³/d) 및 오염물 농도(TSS = 113mg/L, BOD₅ = 114mg/L, TN = 45mg/L)에 일정 비율을 곱하여 만들었다. 유입유량 및 오염물 농도가 상당히 큰 폭으로 변하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같이 유입 유량 및 오염물 농도가 변함에 따라, 유출수 내 고형물 농도와 총질소 농도를 나타내었다. 슬러지 침전성이 좋지 않은 경우 유입 유량 및 오염물 농도가 최고 인 저녁 8시 부근에서 상당히 많은 고형물과 총질소가 유출되는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 평균 유입 유량 및 오염물 농도로 모델링한 Fig. 2~4에 HRT 6h인 경우의 결과보다 유출수 내 오염물 농도가 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 슬러지 침전성이 안 좋은 경우 실제 하수처리장에서는 저녁 무렵에 상당히 낮은 처리효율을 나타낼 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 국내 하수처리장의 처리 효율 평가는 하루 한번의 유출수 분석으로 이루어지기 때문에 일과시간인 낮에 유출수 분석이 이루어 진다면 이와 같은 문제점을 놓칠 우려가

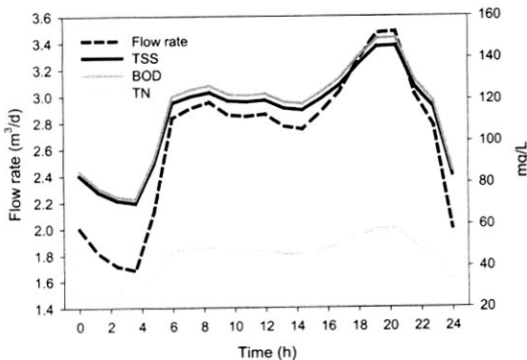


Fig. 6. Daily cycle of influent rate and pollutant concentrations

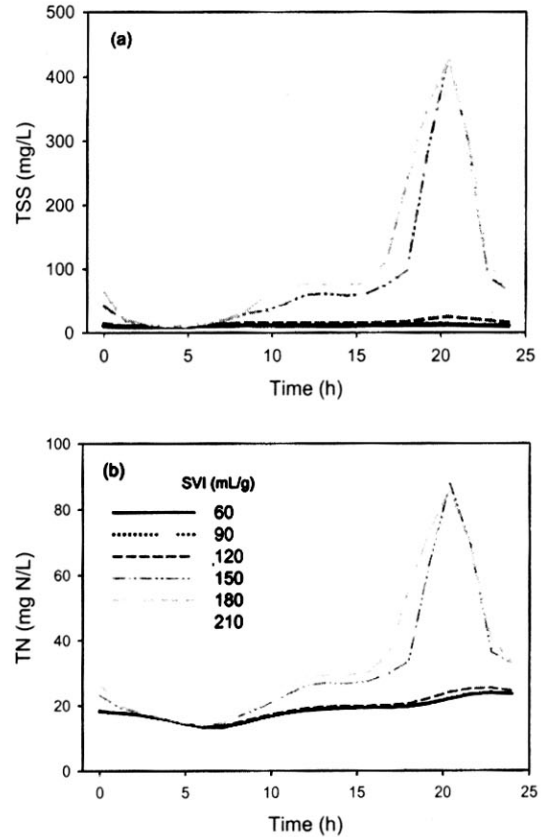


Fig. 7. Daily cycle TSS(a) and TN(b) profile in effluent

생길 수도 있을 것이다.

3.2.3 Iron dust 주입 영향(모델링 상황 4)

슬러지 침전성을 향상시키기 위해 보조제로 iron dust를 DNR 반응기에 주입할 경우 슬러지 침전성이 향상된다(Ngyuen et al., 2005). 따라서 슬러지 침전성이 낮아서 슬러지가 유출될 경우 iron dust 주입으로 인해 갑작스런 SVI 값의 감소가 일어날 경우 유출수 내 고형물 및 총질소 농도의 영향을 모델링하였다(Fig. 8). 앞에서 언급한 바와 같이 슬러지 층 높이가 안정하게 유지된다면 유출수 내 고형물 및 총질소 농도는 낮게 유지할 수 있다. 그리고 안정하게 유지된 상태에서는 슬러지 침전성이 향상되더라도 큰 영향이 없는 것으로 확인할 수 있었다. Fig. 9는 슬러지 침전성이 향상됨에 따라서 최종침전조 내 슬러지 농도 변화를 3차원으로 나타낸 것이다. 본 모델링 조건에서는 SVI를 12mL/g으로 유지시켜 운전하는 것이 최적

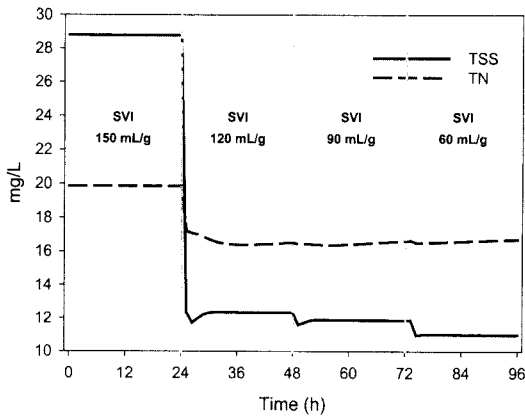


Fig. 8. TSS and TN profile in effluent as decreasing SVI

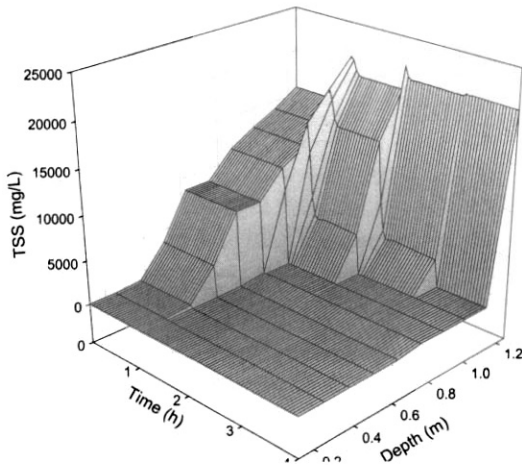


Fig. 9. The TSS concentration distribution in the secondary settling tank as decreasing SVI

인 것으로 판단된다.

3.2 lab-scale DNR 반응기 연속 운전 결과

위 모델링 결과를 lab-scale DNR 반응기 연속 운전 결과로 확인해 보았다. Iron dust 주입 영향을 비교하기 위해, 2개의 lab-scale DNR 반응기를 운전하여 한 반응기에는 iron dust를 주입하고(WID) 나머지 반응기에는 iron dust를 주입하지 않았다(WOID). Fig. 10와 11은 각각 호기조 내 MLVSS 농도와 총질소 제거율을 나타내고 있다. 앞에서 설명한 모델링 결과와 마찬가지로 iron dust를 사용하여 슬러지 침전성이 좋은 경우, 반응조 내 미생물 농도는 더 높았으며, 총질

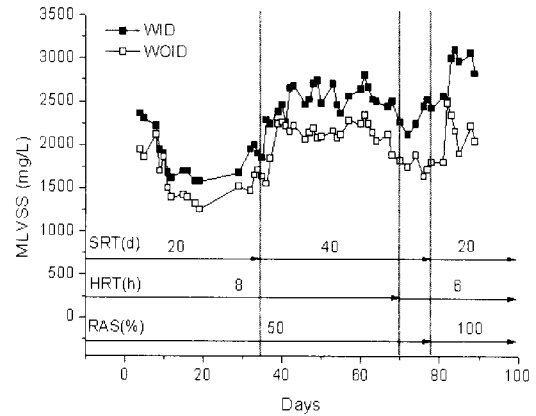


Fig. 10. The profile of MLVSS concentration in oxic tank of the lab-scale DNR reactor.

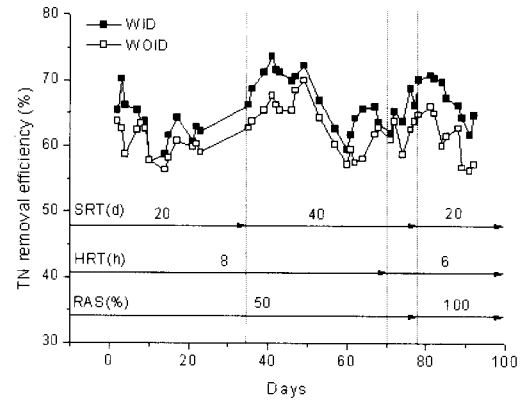


Fig. 11. The profile of TN removal efficiency of the lab-scale DNR reactor.

소 제거율도 더 좋은 것으로 나타났다. 본 실험은 합성하수를 사용하였고 최종침전조 내 슬러지 층 높이가 안정하게 유지되었기 때문에 유출수 내 고형물 농도는 평균 5이하로 매우 낮았다. 그리고 두 반응기의 평균 SVI는 WID와 WOID가 각각 132mL/g과 227mL/g이었다. SVI 값이 비교적 높게 나온 이유는 합성하수 기질로 glucose를 사용했기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

하수처리장에서 슬러지 침전성은 전체 오염물 제거율을 결정하는 중요한 변수이다. DNR 반응기를 GPS-X를 이용하여 모델링한 결과, 최종침전조 내에

서 슬러지 층 높이를 안정하게 유지시키는 것이 매우 중요하며 슬러지가 유출되지 않았을 경우 슬러지 침전성에 따른 영향이 크지 않았다. 또한 슬러지 침전성이 좋다면 낮은 HRT나 높은 SRT로 운전하는 것이 반응조 내 미생물 농도를 높게 유지할 수 있으므로 오염물도 효율적으로 제거할 수 있었다. 슬러지 침전성이 낮은 경우 하수처리장에 유입되는 하수의 유량 및 오염물 농도의 하루 주기 변화로 저녁 무렵에 상당히 많은 오염물이 유출되는 것을 확인할 수 있었다. Iron dust와 같은 슬러지 침전 향상 보조제의 활용으로 슬러지 침전성에 문제가 생겼을 경우 유출수 수질을 향상시킬 수 있었으며, 최종침전조 내 슬러지 층의 안정된 상태가 유지되면 iron dust의 주입으로 인한 효과는 크게 나타나지 않았다. 따라서 슬러지 침전 향상 보조제를 주입할 경우 너무 많은 양을 사용하는 것은 바람직하지 않을 것으로 판단된다. 마지막으로 위와 같은 현상을 lab-scale DNR 반응기로 슬러지 침전성 향상이 DNR 반응기에 미치는 영향을 실험한 결과, 슬러지 침전성은 향상되었으며, 반응조 내 미생물 농도 및 전체 총질소 제거율이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

사사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술 개발사업

(과제번호, 071-051-066)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 정형석, 서창원, 이상형, 신항식 (2005) Investigation and evaluation of effect factors on wastewater characteristics, *Proceeding of the 2005 spring conference of KSEE April 28-30 Suwon*, pp. 102-109.
- APHA (1998) Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th ed., American Public Health Association, Washington D.C.
- Chae, S.R. (2004) Characteristics of nutrient removal and membrane fouling in a vertical membrane bioreactor, PhD. dissertation, KAIST, Deajeon, Korea
- Henze, M., et al. (2000) Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3, IWA publishing, UK London.
- Nguyen L. T., 서창원, 이상형, 정형석, 이상민, 이의신, 신항식 (2005) Effect of iron dust dosage on treatment efficiency in DNR process, *Proceeding of the 2005 spring conference of KSEE April 28-30 Suwon*, pp. 220-226.
- Sakai, Y., Kurakata, S. and Takahashi, F. (1991) Magnetite forced sedimentation of flocs in activated sludge supplemented with ferromagnetic powder of iron oxide, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 71(3), pp. 208-210.