한국환경보건학회지, 제34권 제6호(2008)
J. Env. Hlth. Sci., Vol. 34, No. 6, pp 446~451(2008)

수정 DNR 공정을 이용한 하수처리

최진택 · 남세용*†
서울우유협동조합, *한경대학교 환경공학과
(2008. 11. 4. 접수/2008. 11. 20. 수정/2008. 12. 1. 채택)

Sewage Treatment Using a Modified DNR Process

Jin Taek Choi · Se Yong Nam*†
Seoul Dairy Cooperative
**Department of Environmental Engineering, Hankyong National University*
(Received November 4, 2008/Revised November 20, 2008/Accepted December 1, 2008)

ABSTRACT

In this study, the removal characteristics of organic components and nutrients of sewage taken from the Suwon area were investigated in a lab-scale modified DNR (Daewoo Nutrient Removal) process. The modified DNR process consisted of a sludge denitrification tank, an anaerobic tank, an anoxic tank, an aerobic tank, a secondary anoxic tank and a secondary aerobic tank. The proposed process with the average C/N ratio of 3.5 was performed for the sewage treatment. The results were compared with other existing DNR processes. The organic fractions in sewage were analyzed by measuring the oxygen uptake rate. The resulting removal efficiencies of SS, BOD, COD, TN and TP were 93.1%, 95.5%, 86.1%, 67.8% and 80.6%, respectively.

Keywords: a modified DNR, sewage, organic fractions, biological nutrient removal

I. 서 론

활성슬러지공정을 비롯한 일반적인 생물학적 2차 처리방법은 질산화 과정에서 약간의 질소가 미생물의 세포로 동화되므로 잉여슬러지를 제거함으로써 질소제거 효과를 나타내게 되는데 총질소 제거율은 10~20%에 불과하다. 따라서 활성슬러지법을 일부 변형하여 질소제거공정이 사용된 처리방법을 생물학적 탈질법이라 한다. 이 방법은 하수중의 암모늄 이온이 호기성 상태에서 미생물에 의해 생물학적으로 질산화(nitrification)되고 다시 무산소 상태에서 탈질화(denitrification)반응이 일어나 질소화합물이 질소가스로 환원되는 원리이며, 시스템 내에 pH, 알카리도, 용존산소 농도 및 탈질화 처리조에서의 유기물질 공급여부 등의 영향인자에 의해 반응의 효율이 달라지나 다른 처리법보다 처리효율이 높고 경제적인 처리법이므로 여러 곳에 적용되고 있다.[1,2)]

†Corresponding author : Department of Environmental Engineering, Hankyong National University
Tel: 82-31-670-5177, Fax: 82-31-670-5170
E-mail : namsy@hknu.ac.kr

외국의 경우 고도처리의 대표적인 공정으로 A/O, phostrip 및 UCT공정을 중심으로 각종 공정들이 실제 하수처리장에 적용되고 있지만 이 공정들은 자국의 하·폐수 성상에 맞도록 개발되었기 때문에 유입수의 BOD 농도가 상대적으로 낮은 우리나라의 하수에 대해서는 계획된 처리효율을 나타내지 못하는 경우가 많았다.[3)] 이러한 단점을 보완하기 위해 MUCT, VIP 공정 등 후속 공정들이 개발되었다. 반송슬러지를 혐기조 다음의 무산소조로 유입시켜 질산성 질소를 제거한 후 혐기조로 이송하여 인방출을 방해하는 것을 억제하거나, 반송슬러지내의 질산성질소를 제거하여 혐기조로 반송하는 무산소조1과 내부반송 된 질산성 질소를 탈질시키는 무산소조2로 분리하여 효율을 높인 공정이 MUCT, VIP 공정이다. 하지만 이 공정 역시 내부반송 펌프의 추가 설치 및 유지관리상의 복잡성 등이 단점으로 지적되고 있다.

기존 반송슬러지내의 질산성 질소 제거와 내부 반송 펌프 추가 및 유지관리의 복잡성을 보완한 공정으로 DNR 공정이 개발되었다. 이 공정은 유입수의 낮은 유기물 농도에서도 우수한 처리효율을 나타내며, 적정한 체류시간에서 운전되므로 다른 공정과 비교하여 국내

하수처리장에 비교적 적합한 것으로 알려져 있다.[4]

본 실험에서는 질소, 인 제거 효율을 높이기 위해[5] 기존 DNR 공정에 후탈질조 및 후포기조를 조합하여 실제하수를 대상으로 수정 DNR 공정의 처리율을 살펴보았으며, 현재 국내에 가동되고 있는 DNR 공정의 하수처리 시설과의 처리효율을 비교하였다.

II. 실험방법

1. 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 총 총 체류시간이 11.0 h인 슬러지탈질조(ⓐ, 0.5 h), 혐기조(ⓑ, 1.0 h), 무산소조(ⓒ, 2.0 h), 포기조(ⓓ, 5.5 h), 후탈질조(ⓔ, 1.0 h), 후포기조(ⓕ, 1.0 h)로 이루어진 수정된 DNR 반응조를 10 mm 아크릴판을 이용하여 제작하였다. 원수조는 원수의 온도가 4℃를 유지할 수 있도록 냉장고 내부에 위치하였다. 침전조에는 스크레퍼(1 rpm)를 부착하였고 슬러지탈질조, 혐기조, 무산소조, 후탈질조에는 정속교반장치(60 rpm)를 설치하였다. 폐수의 유입라인, 슬러지반송라인 및 내부반송라인은 peristaltic 펌프를 장착하였으며, 슬러지 인발은 전동밸브와 타이머를 연동하여 주기적으로 인발하였다.

또한 호흡률 측정을 이용하여 유입수의 성상을 알아보기 위하여 정속교반장치를 갖춘 2 l의 원통형 회분식 반응조 3 조를 별도 운전하였다. 반응조는 외부로부터 산소를 차단하였으며, 온도는 20± 1℃를 유지하였다. 반응조의 용존산소 농도가 1 mg/l이하로 떨어지면 포기가 시작되고, 5 mg/l이상 될 시 중단되지만 교반은 계속 실시되어진다. 포기가 끝나고 일정 시간동안에 용존산소의 감소량을 계산하여 OUR 값을 얻을 수 있다.[6,7] 호흡률 측정에 앞서 슬러지에 잔류하는 유기물 및 질소화합물 등의 영향을 최소화하기 위하여 2시간이상 미리 포기시킨 후, 탈 이온수로 3회 세척된 슬러지에 하수를 주입하고 슬러지 호흡률을 측정하였다. 질산화에 의한 산소의 소모를 방지하기 위하여 질산화 억제제인 allythiourea(ATU)를 30 mg/l로 주입하였다. 슬러지의 내생호흡을 구분하기 위하여 유기물을 주입하지 않은 슬러지 자체만의 호흡률을 동시에 측정하여 보정하였다.

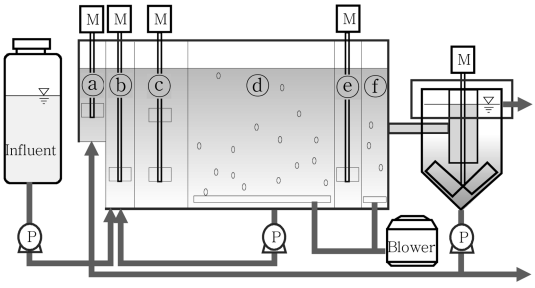


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

2. 실험방법

처리용량 Q는 20 l/day, MLSS 3,000~3,500 mg/l, 내부반송률 100%, 슬러지반송률 60%로 하였으며, 서호천 중상류에 위치한 수원시 북부처리구역의 합류식과 분류식 구간의 합류지점에서 발생하는 하수를 유입수로 사용하여 40일간 실온에서 연속운전을 진행하였다. 반응조의 초기 식종은 DNR 공법을 사용하는 A시 하수처리시설의 반송슬러지를 이용하였다. 유입하수의 성상을 OUR 측정을 통해 알아보았으며, 유입수질 및 유출수질을 대상으로 고형물 제거율, 유기물 제거율, 질소 제거율, 인 제거율 등을 살펴보았다.

분석 항목으로는 유입하수의 특성을 알아보기 위하여 유입하수를 대상으로 pH, DO, TBOD, SBOD, $TCOD_{Cr}$, $SCOD_{Cr}$, $TCOD_{Mn}$, $SCOD_{Mn}$, TSS, VSS, TN, TKN, NH_4-N, NO_3-N, NO_2-N, TP, PO_4-P 등을 분석하였으며, 반응조의 처리효율을 분석하기 위하여 유출수를 대상으로 BOD, COD, SS, T-N, T-P 등을 분석하였다. 그 외 반응조 상태를 관찰하기 위해 반응조의 pH, DO, SV_{30}, SVI, MLSS, MLVSS를 측정하고, 특히 반응조 별 영양염류의 변화 추이를 모니터링하기 위해 각 반응조별 NO_3-N, NH_4-N, PO_4-P, $SCOD_{Cr}$을 분석하였다. 각 항목별 수질분석 방법은 Standard Methods 및 환경오염공정시험법에 준하여 분석하였다.[8-10]

III. 결과 및 고찰

수원시 북부지역에서 발생하는 하수를 유입수로 40일간의 수정 DNR 반응조 운전을 진행하였다. 유입하수의 특성을 알아보기 위하여 유입하수를 대상으로 수온, 고형물, 유기물, 영양염류 및 유입하수의 분율 산정을 위한 미생물 호흡률을 측정하였고, 반응조 운전 이후 7일간의 적응기간을 거친 후 유입 · 유출수를 대상으로 고형물, 유기물 및 영양물질의 제거율을 모니터링하였으며, 슬러지탈질조로부터 혐기조, 무산소조, 포기조, 후탈질조, 후포기조에 이르는 각 조별로 유기물 농도 및 영양염류 농도의 변화 추이를 모니터링하였다.

1. 유입하수의 특성 및 유기물 분율 산정

유입하수의 특성을 알아보기 위하여 유입하수를 대상으로 고형물, 유기물, 영양염류 등을 분석하였다. 분석

결과를 평균, 최소, 최대로하여 Table 1에 정리하였다. 하수의 유기물 분율을 파악하기 위하여 미생물의 호흡을 측정하는데, 이는 특정한 조건에서 생물학적 산소소모율(OUR)을 측정하고 이를 해석하여 생분해되는 유기물을 빨리 분해되는 유기물(S_S)과 천천히 분해되는 유기물(X_S)로, 생분해되지 않는 유기물을 수용성(S_I)과 불용성(X_I)으로 구분하였다.[11] 내생호흡을 보정한 유입하수의 호흡률 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었으며, 이를 해석하면 Table 2와 같은 분석 결과를 얻을 수 있다. S_S의 경우 23.3 mg/l로서 TCOD의 8.47% 정도이며, X_S는 45.10 mg/l로서 TCOD의 16.40%를 차지하고 있었다. S_I는 53.50 mg/l로서 TCOD의 19.45%를 나타내었고 X_I는 98.10 mg/l로서 TCOD의 35.67%를 구성하였다.

Table 1. Composition of sewage

Components	Concentration
DO (mg/*l*)	0.4 (0.2~0.8)
TBOD (mg/*l*)	163.0 (118.3~226.3)
SBOD (mg/*l*)	56.4 (27.2~75.4)
$TCOD_{Cr}$ (mg/*l*)	208.2 (104.2~339.5)
$SCOD_{Cr}$ (mg/*l*)	83.1 (55.4~153.3)
$TCOD_{Mn}$ (mg/*l*)	116.2 (85.2~198.5)
$SCOD_{Mn}$ (mg/*l*)	47.9 (33.7~70.3)
TSS (mg/*l*)	134.4 (71.7~173.3)
VSS (mg/*l*)	113.3 (70.3~156.7)
TN (mg/*l*)	30.6 (19.8~40.2)
TKN (mg/*l*)	28.3 (17.2~37.8)
NH_4-N (mg/*l*)	17.4 (12.0~20.3)
NO_3-N (mg/*l*)	2.0 (1.1~2.9)
NO_2-N (mg/*l*)	0.2 (0.1~0.6)
TP (mg/*l*)	2.9 (1.1~4.0)
PO_4-P (mg/*l*)	2.0 (0.8~2.7)
Alkalinity (mg/*l*)	159.1 (140.0~172.0)
pH	7.4 (7.1~7.8)

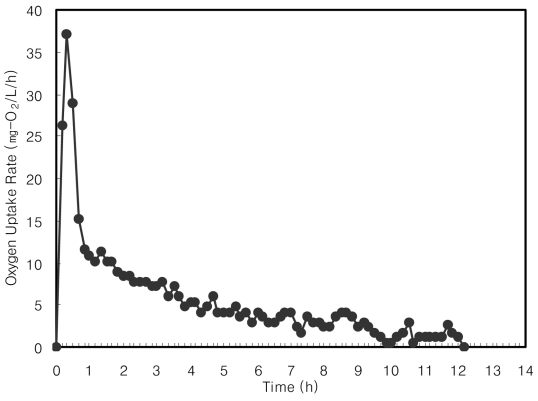


Fig. 2. OUR graph for the sludge and sewage mixture.

2. 고형물 및 유기물 처리결과

유입 · 유출수의 고형물 측정결과를 Fig. 3에, 유기물 측정 결과를 $TBOD_5$ 측정을 통해 Fig. 4에, $TCOD_{Cr}$ 및 $TCOD_{Mn}$ 측정을 통해 Fig. 5에 각각 나타내었다. SS의 경우 유입수는 60.0~187.0 mg/*l*, 평균 128.3 mg/*l*로 유입되었으며, 유출수는 3.0~40.5 mg/*l*, 평균 8.8 mg/*l*로 유출되어 74.1~98.1%의 처리효율을 나타내었다. 특히 반응조 운전 17일 부터는 유입수질의 변화와 상관없이 96% 이상의 우수한 처리효율을 나타내었다. 유입수의 $TBOD_5$는 95.1~226.3 mg/*l*으로 평균 159.0 mg/*l*를 내타내었고, 유출수는 1.4~20.1 mg/*l*으로 평균 7.2 mg/*l*로 나타나 87.1~99.2%의 처리효율을 보이고 있다. 유입수질의 $TBOD_5$는 인공하수가 아닌 실제 하수를 유입수로 사용하여 시료채취 일자에 따라 변화의 폭이 컸으며, 특히 23일 이후에는 일시적으로 증가하여 이에 따른 처리효율도 10% 이상 감소하였다가 다시 38일까지 서서히 회복하는 경향을 보였다. COD_{Cr}은 유

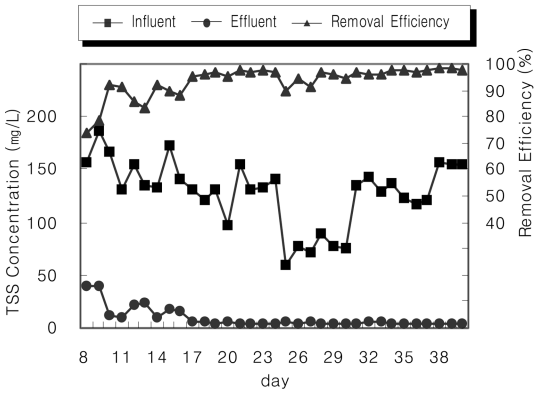


Fig. 3. Concentration and removal efficiency of SS.

Table 2. The organic fractions in sewage (mg/*l*)

TCOD	SCOD	SS (SS/TCOD)	SI (SI/TCOD)	XS (XS/TCOD)	XI (XI/TCOD)
275.00	146.60	23.30 (8.47%)	53.50 (19.45%)	45.10 (16.40%)	98.10 (35.67%)

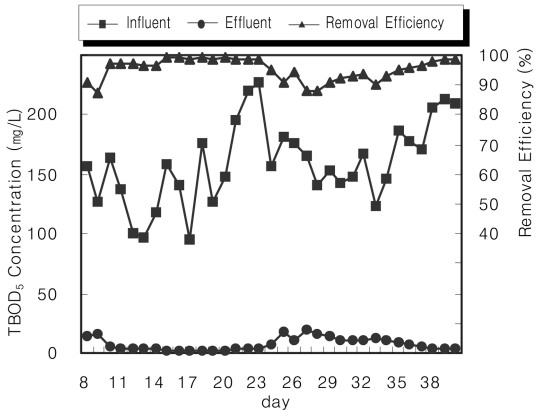
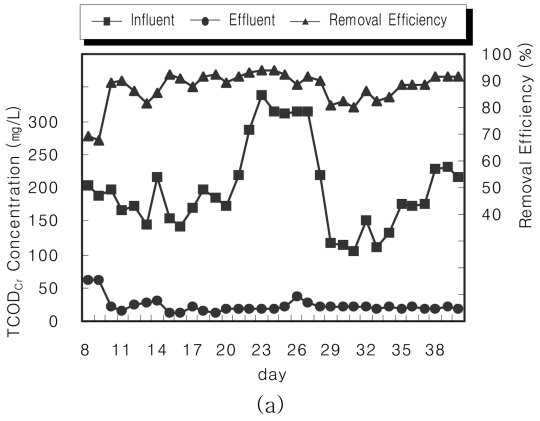


Fig. 4. Concentration and removal efficiency of BOD.



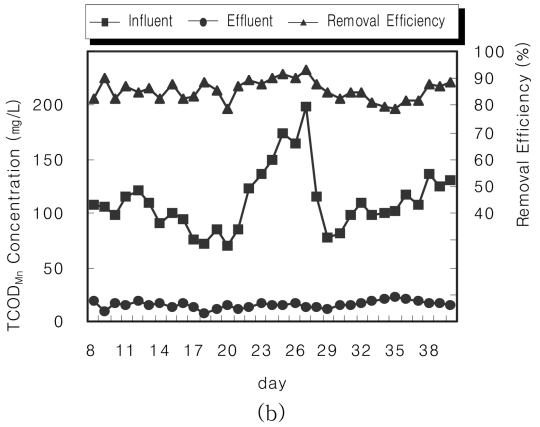
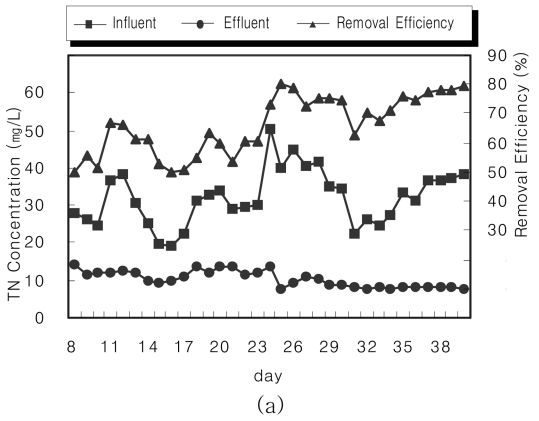


Fig. 5. Concentrations and removal efficiencies of COD_{Cr} (a) and COD_{Mn} (b).

입수는 104.2~339.5 mg/l, 평균 198.4 mg/l로 유입되었고, 유출수는 12.0~62.4 mg/l, 평균 23.3 mg/l로 유출되어 67.5~94.2%의 처리효율을 보이고 있다. $TCOD_{Mn}$은



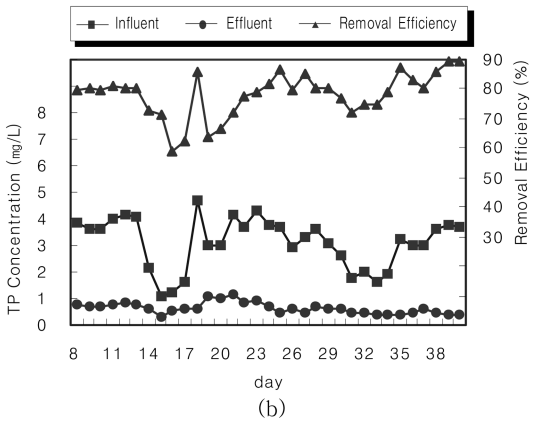


Fig. 6. Concentrations and removal efficiencies of TN (a) and TP (b).

유입수가 70.0~198.5 mg/l로 평균 111.6 mg/l를 내타내었고, 유출수는 8.2~22.0 mg/l로 평균 15.5 mg/l로 나타나 78.5~92.8%의 처리효율을 보이고 있다.

3. 총질소 및 총인 처리결과

유입·유출수의 총질소 및 총인 농도의 측정결과를 Fig. 6에 정리하였다. 유입수의 TN 농도는 19.3~50.1 mg/l로 평균 32.0 mg/l를 내타내고 있으며, 유출수의 TN 농도는 7.9~14.1 mg/l로 평균 10.3 mg/l로 나타나 47.9~80.3%의 처리효율을 나타내고 있다. 또한 유입수의 TP 농도는 1.1~4.7 mg/l로 평균 3.1 mg/l로 나타났으며, 유출수의 TP 농도는 0.3~1.2 mg/l로 평균 0.6 mg/l로 조사되어 58.7~89.5%의 처리효율을 나타내고 있다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 수정 DNR 공정의 연속 모형실험 결과 고형물 및 유기물 제거율이 비교적 짧은 기간 내에 안정화가 이루어 진 것과는 대조적으로, TN 및 TP의 제거율은 점진적으로 향상하여 대략 25일 이후에 안정화가 이루어 졌다. 또한 이 시기의

TN 처리효율은 75.2%, TP 처리효율은 82.7% 로 나타나, 현재 DNR 공정으로 가동되어지는 전국 15개 시군구의 18개 하수처리시설의 평균 처리효율인[12] TN 67.7%, TP 76.8%에 비하여 보다 양호하게 처리되는 것으로 조사되었다.

4. 반응조별 영양염류 변화

각 조별로 유기물 및 영양염류의 거동을 모니터링하여 Fig. 7에 나타내었다. 포기조에서 질산화와 무산소조에서 탈질반응을 거치면서 NH_4-N는 유입수 17.9 mg/l에서 4.37 mg/l까지 낮아지며, 한편 반송슬러지 내 NO_3-N의 농도는 11.04 mg/l까지 증가했다가 후탈질조에서 내생탈질 반응으로 5.09 mg/l까지 감소하고 다시 후포기조에서 NH_4-N의 질산화로 6.15 mg/l까지 증가한 후 침전조에서 방류되거나 탈질조로 반송된다. 이때의 유입 유출수의 SCOD는 각각 64.9 mg/l와 12.5 mg/l로 조사되었다. 또한 각 반응조별 PO_4-P의 농도는 탈질조가 0.84 mg/l를 나타내고 있고 혐기조에서 1.18 mg/l까지 증가되는 것을 볼 수 있다. 이는 혐기조 체류시간인 1시간 동안 미생물의 인 방출이 일어나 PO_4-P의 농도가 증가한 것이며, 다시 호기조에서 미생물의 과잉섭취원리에 의해 미생물의 세포내로 PO_4-P을 섭취하게 되어 결국에는 0.26 mg/l까지 낮아지는 것을 살펴 볼 수 있다.

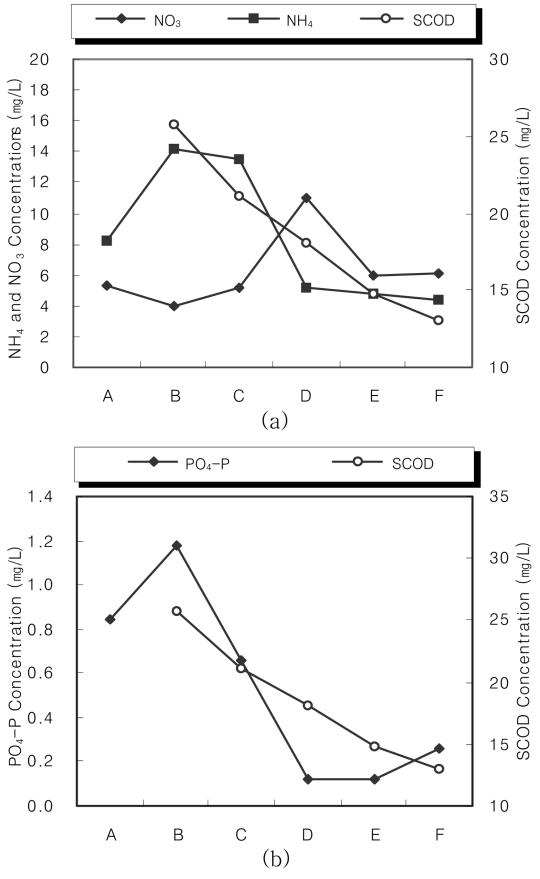


Fig. 7. Behavior of nitrogen compounds (a) and phosphorus (b) in the proposed system (A: Sludge denitrification tank, B: anaerobic tank, C: anoxic tank, D: aerobic tank, E: secondary anoxic tank, F: secondary aerobic tank).

5. DNR 공정을 이용한 하수처리 시설과의 비교

환경부(2007)[12] 통계자료에 기초하여 현재 DNR 공정으로 운전되고 있는 전국 15개 시군구의 18개 하수처리장을 대상으로 유입수질, 유출수질, 처리효율을 각각 조사하였다. SS의 경우 87.4~99.4%, BOD 71.6~99.4%, COD 66.1~93.6%, TN 22.8~81.5%, TP 45.0~95.5%의 처리효율을 나타내었다. 이를 다시 DNR 공정 이후 MDF(Micro Disk Filter) 등의 후속처리공정이 연결된 하수처리시설 14개소와 후속공정 없이 DNR 공정 이후 UV소독 공정만 거친 후 바로 방류하는 4개소의 하수처리시설로 나누었으며, 하수처리시설의 주요한 설계인자 중 하나인 C/N 비를 기준으로 수정공정의 효율을 간접적으로 평가해 보고자 모형실험 결과와 비교 분석하여 Fig. 8에 정리하였다. COD_{Mn}을 기준으로 C/N 비를 나타내었다. 일반적으로 우리나라 하수처리시설은 C/N 비가 낮아 계획된 영양염류 제거효율을 나타내지 못하는 것으로 알려져 있다. 결과에서도 몇몇 하수처리시설을 제외하고 대체적으로 C/N 비가 높은 시설 일수록, 후속공정이 연계되어 있는 시설일수록 TN, TP의 제거효율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 후속

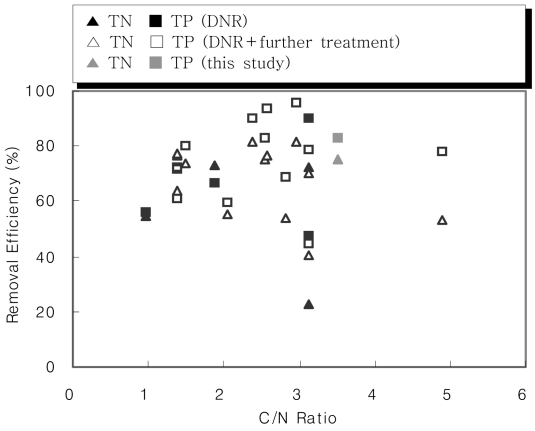


Fig. 8. Comparison of nutrients removal efficiencies of this study and other existing DNR processes.

공정이 연계된 하수처리시설의 TN 평균 제거율은 67.9%(40.3~81.15%), TP 평균 제거율은 75.4%(45.0~95.5%)로 조사되었다. 반면 후속공정이 없는 하수처리시설의 TN 평균 제거율은 55.6%(22.8~73.2%), TP 평균 제거율은 65.0%(47.4~90.0%)로 조사되어 후속공정에서 TN 및 TP의 추가 제거가 이어지는 것을 확인할 수 있었다. 수정 DNR 공정의 TN 제거율은 75.2%로 후속공정이 있는 하수처리시설에 비하여 7.3%, 후속공정이 없는 시설에 비하여 19.6% 처리효율이 높게 나타났으며, TP 제거율은 82.7%로 후속공정이 있는 시설에 비해 7.3%, 후속공정이 없는 시설에 비하여 17.7% 처리효율이 개선되는 것으로 나타났다.

IV. 결 론

후탈질조 및 후포기조가 조합된 수정 DNR 반응조를 제작하여 실 하수를 대상으로 연속운전하며 유입 · 유출수의 고형물, 영양물질 및 유기물의 제거율을 모니터링 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유입하수의 OUR 측정 결과 S_S의 경우 23.30 mg/l로서 TCOD의 8.47%를 차지하였고, X_S는 45.10 mg/l로서 TCOD의 16.40%, S_I는 53.50 mg/l로서 TCOD의 19.45%, X_I는 98.10 mg/l로서 TCOD의 35.67%를 구성하였다.

2. 고형물은 평균 128.3 mg/l로 유입된 후 8.8 mg/l로 유출되어 93.1% 제거효율을 나타내었으며, 유기물은 TBOD로 95.5%, $TCOD_{Cr}$으로 88.3%, $TCOD_{Mn}$으로 86.1% 제거효율을 나타내었다.

3. 영양물질로 TN은 67.8%, TP는 80.6% 제거되었으며, 기존 운전되고 있는 DNR 공정과 C/N 비에 따른 간접비교를 통해 수정 DNR 공정이 TN 처리효율은 7.3~19.6%, TP 처리효율은 7.3~17.7% 증가하는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. Park, Y. S., Woo, H. T. and Kim, D. S. : A study on the organic, nitrogen and phosphorus removal in $(AO)_2$ SBR and A_2O SBR. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(4), 340-348, 2005.
2. Park, Y. S., Jeong, N. S. and Kim, D. S. : A comparison of nutrients removal characteristics by the variation of organics in A2O SBR and A2O SBBR for the small sewerage system. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(5), 451-461, 2006.
3. Yoon, C. H., Kim, M. S. and Kim, S. H. : Characteristics of biological nitrogen removal for low C/N ratio municipal wastewater using methanol as an external carbon source in A2O fluidized media process. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **28**(6), 687-692, 2006.
4. Park, M. G., Chang, Y. S., Park, C. H. and Park, C. L. : A study on advanced municipal wastewater treatement by daewoo nutrients removal system. *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, **9**(4), 115-123, 1995.
5. Ahn, K. H., Hwang, J. H. and Ahn, Y. M. : Effects of external carbon supply on nutrient removal of the continuous flow intermittent decant extended aeration process. *Proceeding of Korean Society of Water and Wastewater*, **E-19**, 433-436, 2000.
6. Shin, H. S., Jeong, H. S. and Nam, S. Y. : Determination of active biomass concentrations in sludge by respirometry. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, **21**(2-B), 165-170, 2001.
7. Henze, M., Grady, C. P. L., Jr, Gufer, W., Marais, G. V. R. and Matsuo, T. : Activated sludge model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1, IAWPRC, London, 1987.
8. Ministry of Environment : Standard Methods for the Test and Examination of Water Quality, 2004.
9. APHA, WEF & AWWA : Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th Edition, Washington, D.C., 2005.
10. Kim, H. S. : Quality of water analyses and experiment, Donghwatechnology Publishing Company, 2004.
11. Wentzel, M. C., Mbewe, A. and Ekama, G. A. : Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal waste waters. *Water SA*, **21**(2), 117-123, 1995.
12. Sewerage Division, Water Supply and Sewerage Policy Office, Ministry of Environment : Statistics of sewerage (2006) 2007, Ministry of Environment, 2007.