

공기부상반응조에서 체류시간과 반송율에 의한 유기물질 및 질소제거 향상에 관한 연구

김진기 · 유성환 · 임봉수^{*,†}

관동대학교 대학원 환경공학과

^{*}대전대학교 대학원 환경공학과

Improvement of Organics and Nitrogen Removal by HRT and Recycling Rate in Air Lift Reactors

Jin-Ki Kim · Sung-Whan Yu · Bong-Su Lim^{*,†}

Department of Environmental Engineering, Graduate School, Kwandong University

^{*}Department of Environmental Engineering, Graduate School, Daejeon University

(Received 5 August 2005, Accepted 27 October 2005)

Abstract

This study was performed to evaluate the air lift reactors (ALR) by variations of HRT and recycling rate. Air lift reactor was composed of bioreactor and clarifier above it. To remove organic matters and nitrogen through the formation of microbic film and filtration, bio-filter reactors were filled with clay, glass, bead, waste plastic, respectively. Influent wastewater was fed to biofilter reactor, and effluent wastewater from bio-filter reactor was injected ALR again, instead of adding external carbon source. Effluent BOD concentration was satisfied with lower than 10 mg/L in recycling rate 100% regardless of the variation of HRT and the kinds of media materials. In HRT 4 hr, recycling rate 100%, BOD removal efficiency rate was from about 85 to 90%, COD removal efficiency rate was higher than 90%. Effluent TN concentration was satisfied with less than 20 mg/L, if HRT was maintained by over than 6 hr regardless of recycling rate and media materials. Over than HRT was 4 hr, microbes concentration in air lift reactor was maintained over than 2,500 mg/L constantly, not sensitive to environmental condition, and organic removal was effective as it was higher.

keywords : Air lift reactor, Bio-filter, Hydraulic retention time (HRT), Recycling rate

1. 서론

도시하수처리에는 일반적으로 활성슬러지 공법이 널리 이용되지만 이 공법은 대규모의 부지가 요구되며 부하변동이 클 경우에 공정관리가 쉽지 않은 단점을 지닌다. 더욱이 탈질이나 인제거를 고려할 경우 공정규모가 커지고 복잡한 슬러지 반응이 필요하다. 이에 반해 생물막 공정은 고부하 처리가 가능하면서도, 잉여슬러지 발생량이 적고, 반응조내 MLSS 유지를 위한 슬러지 반응이 불필요하여 하수처리장의 규모를 크게 축소화할 수 있는 장점이 있다 (Sutton et al., 1994).

근래에 들어 공기부상반응조(Air Lift Reactor; 이하 ALR)의 낮은 전단력과 동력비 그리고 높은 산소전달률과 단순한 구조, 설치면적 최소화, 에너지절약 등의 장점이 부각되어 동·식물세포 배양조, 사상균 배양조, 단일 단백질 획득을 위한 발효조 등에 널리 이용되고 있다(Heijnen et al., 1992; Wood et al., 1998). 재래식 활성슬러지 공정은

넓은 부지소요와 독성 유입에 대한 취약성, 고액분리 문제 등과 같은 약점을 안고 있기 때문에 공기부상반응조는 그 대안에서 주목받아 왔다(Heijnen et al., 1993). ALR은 담체에 부착된 미생물에 의한 생물학적 반응을 이용한 처리방법으로 높은 미생물 양과 제거율, 긴 미생물 체류시간과 낮은 슬러지의 생성 등의 장점이 있다. 또한, 고부하율로 운전되며 단면적 대 높이의 비가 큰 전형적인 형태로 인해 상대적으로 소요면적이 작다(Mulder et al., 1990).

본 논문의 공기부상반응조에서 상승관은 종속영양균과 질산화균이 부착된 담체가 유동되는 호기조건의 유동상 생물막 반응조로, 하강관은 탈질균이 부착된 담체가 고정되어 있는 무산소 조건의 고정상 생물막 반응조로 사용하여 유기물질과 질소를 동시에 제거될 수 있을 것으로 예상된다. 특별히 하강관에서의 무산소 상태의 영역은 무산소 조건에서 탈질효과를 높일 것으로 기대된다.

본 연구의 목적은 공기부상조에서 외부탄소원을 첨가하지 않고 미처리수를 다시 공정에 주입하여, 반송율과 체류시간을 변화시킬 때 유기물질과 질소제거를 향상시키는 적정 반송율과 체류시간을 제시하고자 한다. 이 경우 Bio-filter를 이용하여 무산소조건에서 여재의 비표면적과 공극

[†] To whom correspondence should be addressed.

bslim@dju.ac.kr

에 의한 생물막형성으로 제거효율 향상을 피하게 된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치인 ALR은 크게 두 부분인 반응조와 상부의 침전지로 구성되어 있다. 반응조는 내부관(Draft tube)에 의해 폭기 상향흐름영역(Riser)과 비폭기 하향흐름영역(Downcomer)으로 나누어져 있다. 재질은 두께 5 mm 투명 아크릴로 제작하였으며, 반응조의 유효용적은 약 6.4 L이고, 침전지의 유효용적은 4.5 L이다. 반응조의 기본적인 형태는 Fig. 1과 같다.

폐수의 주입은 정량주입펌프를 이용하여 Bio-Filter에 유입시켰으며, 공기펌프로 공급되는 공기는 3.5 LPM으로 일정하게 반응조 하부에 상향으로, ALR에서는 물과 여재인 활성탄(평균직경이 1~2 mm, 평균밀도는 0.575 g/mL)으로 각 반응조에 500 g씩 첨가하였다. 실험 시 폐수는 대학교 오수처리장 유입수를 사용하였으며, 유입수의 성상은 Table 1과 같으며 일반적인 도시하수에 비해 매우 저농도 오수이며 유기물질은 매우 낮고 질소성분은 높은 오수이다. 유입수의 pH는 평균 7.1 정도로 반응조의 미생물에 독성이 없는 것으로 판단된다.

Bio-filter는 중앙부분에 약 15 cm 두께로 충전물을 충전하였으며, ALR에서 나오는 유출수와 유입수를 하향방향으로 흐르게 하여 충전물을 통과하도록 하였다. Bio-Filter에 충전한 충전물의 특성과 사진을 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다. 충전물중 C#1은 점토, C#2는 유리알, C#3는 폐플라스틱 조각이다.

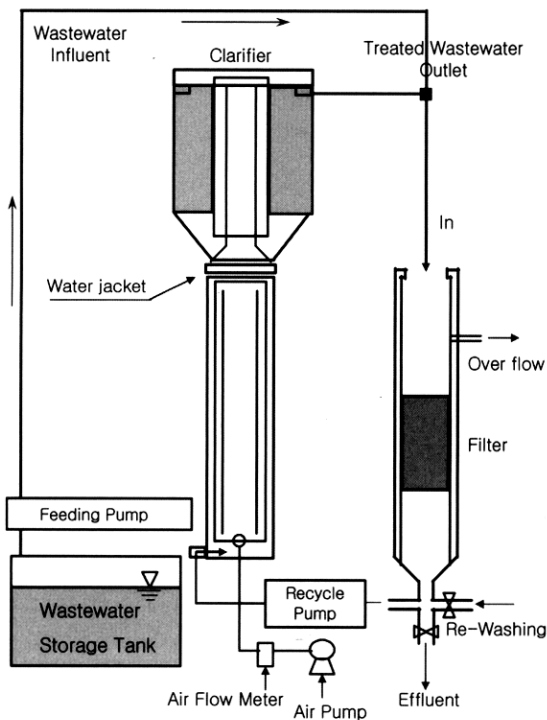


Fig. 1. A schematic diagram of ALR.

Table 1. Characteristics of influent wastewater

Components	Unit	Concentration	
		Range	Average
Temperature	°C	18 ~ 25	21.5
pH	-	6.8 ~ 7.3	7.1
BOD	mg/L	18 ~ 91	55
CODcr	mg/L	80 ~ 368	224
TN	mg/L	21.0 ~ 75.6	48.3

Table 2. Characteristics of Bio-Filter media

Type	Bulk density (g/cm ³)	Porosity (%)	Average diameter (mm)
C#1 Clay	1.51	38.2	3.9
C#2 Glass bead	2.29	33.1	6.7
C#3 Waste plastic	0.46	61.5	14.0

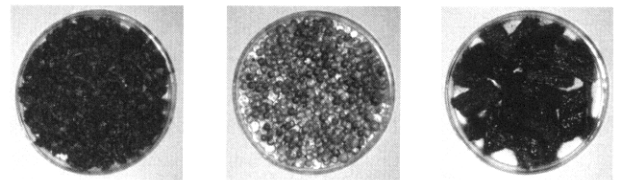


Fig. 2. A picture of Bio-Filter media.

2.2. 실험방법

폐수는 Bio-Filter(C#1, C#2, C#3) 상부에 주입되어 각각의 Bio-Filter 여재를 통과한 후 ALR 하부에 반응물의 변화에 따라 주입된다. ALR 내에 유입된 폐수는 생물활성탄과 반응하여 상부의 최종 유출부로 처리수가 나오게 된다. 수리학적 체류시간(HRT)은 2, 4, 6, 8 hr으로 변화를 주어 각 HRT마다 7일간의 간격으로 반응율(50, 100, 200%)을 변화시켰다. 공기량은 3.5 LPM으로 유지시키고 ALR 하부에 주입하여 순환되도록 하였다. 공기량을 3.5 LPM으로 고정한 이유는 공기량을 2.5~3.0 LPM으로 유지하는 조건에서 가장 좋은 유기물 및 질소제거를 보였고 보고되었고(임, 2001), 질소제거를 더욱 높이기 위해서는 공기량을 3.5 LPM으로 높이는 것이 더욱 유리하다고 보고되었다(서, 2004). Table 3에 ALR의 전체적인 운전방법을 나타내었다. 운전온도는 18~25°C에서 운전하였다. 시료분석방법은 Standard Methods(APHA, 1998)에 의해 실시하였다.

Table 3. Nominal operating condition of ALR

Bio-Filter media	HRT (hr)	Recycling Rate (%)	Air flow velocity (L/min)
Clay (C#1)	2, 4, 6, 8	50, 100, 200	
Glass bead (C#2)	2, 4, 6, 8	50, 100, 200	3.5
Waste plastic (C#3)	2, 4, 6, 8	50, 100, 200	

3. 결과 및 고찰

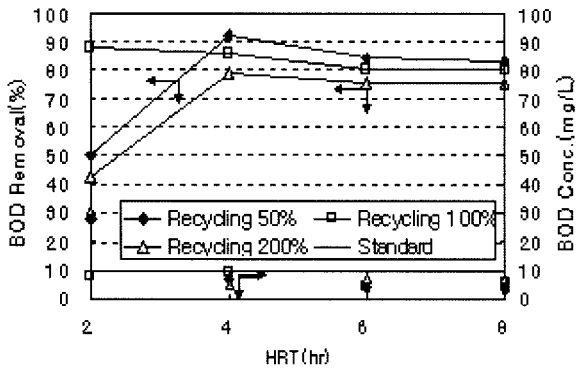
3.1. 유기물질 제거

Fig. 3은 ALR의 HRT 변화에 따른 BOD 제거율을 비교하여 나타낸 것이다. C#1에서는 HRT 4 hr 이상에서 세 반송율 모두가 좋은 제거율을 보였다. 가장 좋은 BOD 제거율은 HRT 4 hr, 반송율 50%에서 92.4%를 나타냈다. HRT 8 hr에서는 반송율에 큰 영향없이 BOD 제거율이 약 80%를 보였다. 이것으로 HRT가 길어질수록 반송율에는 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알았다. 반송율에 따라 약간의 BOD 제거율 차이는 있었지만 반송율 100%에서는 HRT에 관계없이 BOD 제거율이 항상 70~80% 이상을 보였다. C#1, C#2, C#3의 HRT 4 hr과 반송율 50%에서 BOD 제거율을 비교하면 각각 92%, 90%, 85%로 여재에 따른 변화의 폭은 크지 않은 편이다. HRT 4 hr, 반송율 100%의 운

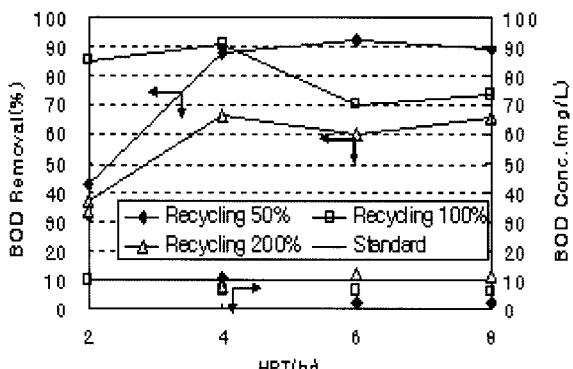
전조건에서 약 85~90%의 BOD제거율을 갖으며, HRT 6 hr으로 증가시 약 70~90%로 감소하는 경향을 띠고 있다.

현재 우리나라 방류수 수질기준중 특정지역기준에서는 BOD는 10 mg/L 이하로 규제하고 있으며, 2008년 1월 1일 이후로 특정지역기준 이외에서도 BOD 10 mg/L 이하로 강화한다고 한다(환경부, 2002). 본 연구 결과 반송율 100% 운전 조건에서는 HRT에 관계없이 처리수 BOD 농도가 10 mg/L 이하로 배출되었다.

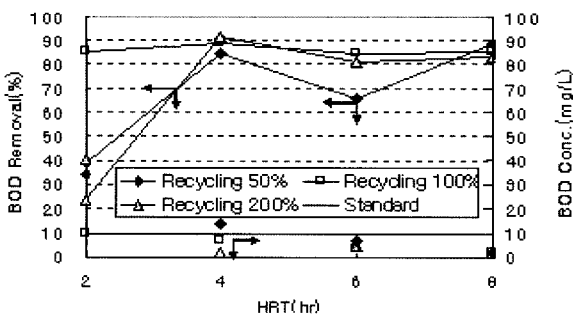
생물학적 처리공정에서 유입 BOD 농도가 너무 높은 농도로 유입되면 과부하로 인해 미생물이 충분히 분해시키지 못해 유기물은 미처리되고, 너무 낮은 농도로 유입된다면 저부하로 인해 미생물들의 먹이 경쟁과 고갈로 인해 처리수의 효과를 볼 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 부하율을 계산하여 최적 반송율을 찾으려 하였으며 F/M비와 BOD 제거율을 Fig. 4에 나타내었다.



(a) C#1

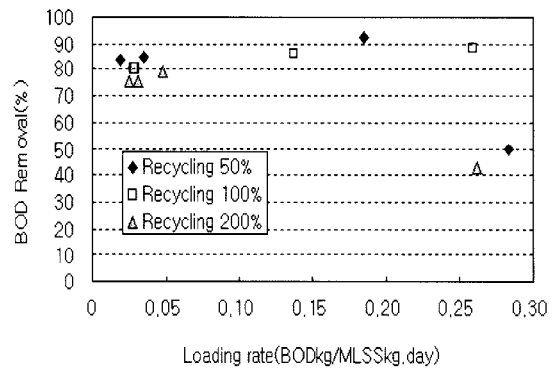


(b) C#2

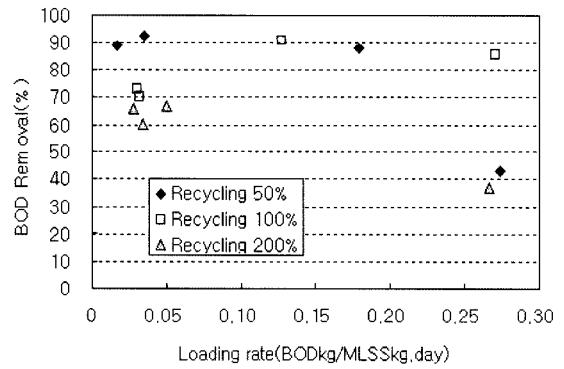


(c) C#3

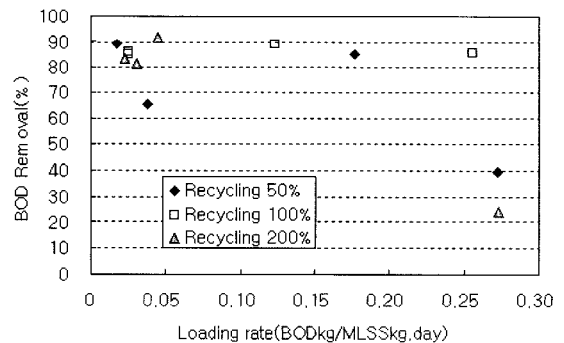
Fig. 3. BOD removal efficiency vs HRT.



(a) C#1



(b) C#2



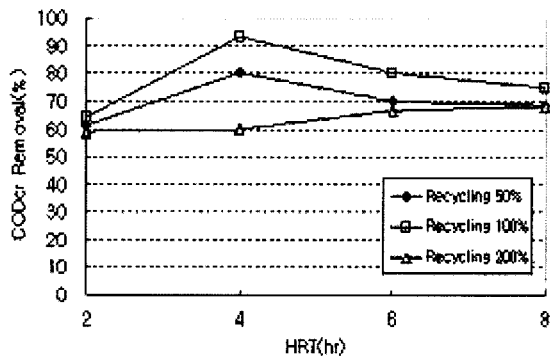
(c) C#3

Fig. 4. BOD removal efficiency on loading rate (F/M ratio).

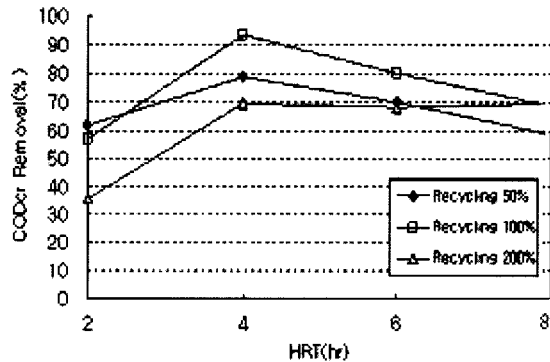
F/M비는 $0.2 \text{ kgBOD/kgMLSS} \cdot \text{day}$ 이하에서 C#1, C#3는 반송율에 관계없이 약 80~90% 정도 BOD 제거율을 보였고, C#2는 약 60~90% 정도로 약간 낮은 BOD 제거율을 보였다. F/M비가 $0.25 \text{ kgBOD/kgMLSS} \cdot \text{day}$ 이상에서는 C#1, C#2, C#3 모두 반송율 50, 200%에서 BOD 제거율이 50%를 넘지 못하였다. 그러나 반송율 100%는 부하율에 따라 큰 영향을 받지 않고 $0.25 \text{ kgBOD/kgMLSS} \cdot \text{day}$ 이상에서도 85% 이상의 좋은 BOD 제거율을 보였다. 그러므로 F/M비 $0.3 \text{ kgBOD/kgMLSS} \cdot \text{d}$ 이하 부하에서 반송율을 100%로 유지하는 것이 처리수 수질에 효과적일 것으로 판단된다.

Fig. 5는 ALR의 HRT 변화에 따른 COD 제거율을 비교하여 나타낸 것이다.

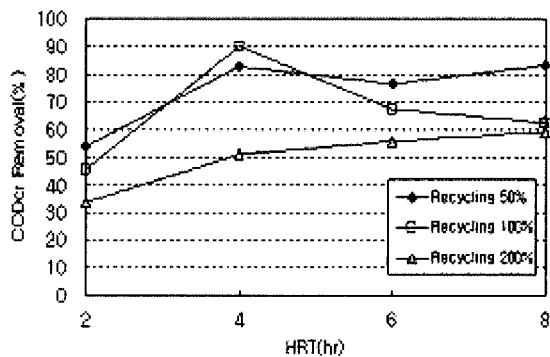
C#1은 HRT 2, 8 hr에서 반송율에 관계없이 약 60%와 70%의 COD 제거율을 각각 보였다. 하지만 HRT 4 hr에서는 반송율 100%가 93.3%로 가장 좋은 제거율을 보였다.



(a) C#1



(b) C#2



(c) C#3

Fig. 5. COD removal efficiency on HRT.

HRT 4 hr과 반송율 100%에서 여재에 따른 변화는 크지 않고 90% 이상의 제거율을 나타내고 있다. C#2는 반송율에 따른 제거율을 보면 HRT 4 hr와 6 hr의 경우 반송율이 100%, 50%, 200% 순으로 양호한 제거율을 보이고 있다. C#3은 반송율이 200%인 경우가 제거율이 매우 낮았으며, 반송율이 50%와 100%의 경우는 HRT 4 hr와 6 hr에서는 상호 비슷한 제거율을 보이고 있다. BOD 제거율과 COD 제거율이 여재의 종류에 따라 동일한 경향을 보이지 않고 있는 것은 유입수의 농도가 변동이 심한 이유로 판단된다. 따라서 HRT와 반송율에 따른 제거율 이외에도 처리수의 농도를 고려하여 분석하였다. 종합적으로 반송율 100%의 운전조건에서 HRT 4 hr인 경우는 90% 이상의 제거율을 갖고 있지만, HRT 6 hr로 증가하면 약 70~80%의 제거율로 감소하여 BOD보다도 더 감소되는 경향이다.

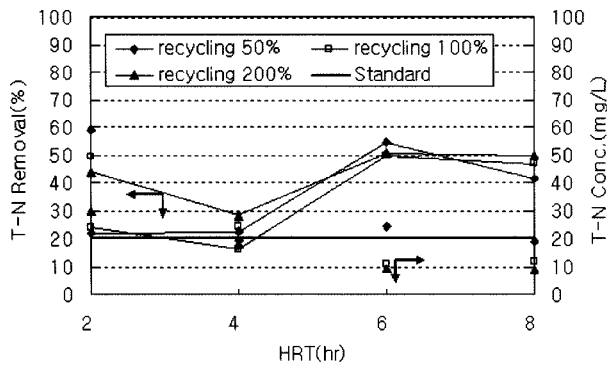
COD 제거는 선(2002)에 의한 연구에서도 반송율 100%에서 가장 좋은 유기물 제거를 보였다고 보고되었으며 본 연구에서는 반송율 100%, HRT 4 hr에서 90% 이상의 가장 좋은 COD 제거율을 보여 다른 문헌과 비교할 때 최적 반송율은 100%인 것으로 판단된다.

3.2. 질소 제거

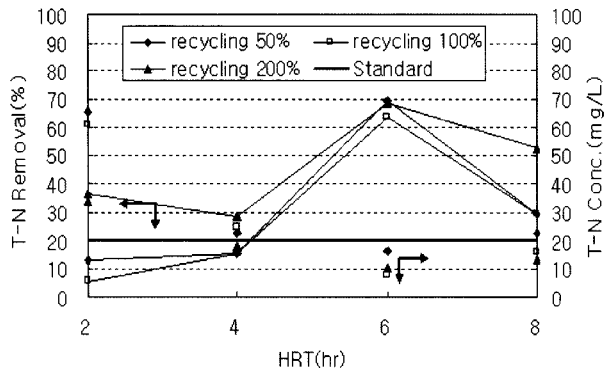
Fig. 6은 HRT에 따른 TN 제거율을 나타내고 있다. 본 실험에서 유입수는 T-N을 측정하지 않고 TKN(Total Kjeldahl Nitrogen)을 측정하였다. 그 이유는 우리나라 하·오수 배출 특성상 질소 성분이 대부분 유기질소 $\text{NH}_4\text{-N}$ 로 존재하고, NO_x 의 농도는 매우 낮아 거의 무시되기 때문이다. 처리수의 질소는 TKN농도에 $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 포함되어 있는 총질소로 보았다.

C#1에서는 다른 반송율에 비하여 반송율 200%가 가장 좋은 TN 제거율을 보였으며, HRT 6 hr일 때는 반송율에 관계없이 약 60% 정도의 좋은 TN 제거율을 얻었다. TN 유출수 농도가 HRT, 반송율에 관계없이 현재 우리나라 방류수 수질기준 20 mg/L 이하에 만족하려면 운전조건을 HRT 6 hr, 반송율 100% 이상으로 유지시켜야 한다. C#2에서도 다른 반송율 비하여 반송율 200%에서 가장 좋은 TN 제거율을 보였다. 특히, HRT 6 hr에서는 반송율에 관계없이 TN 제거율이 65% 정도를 보였다. TN 유출수 농도는 강화되는 방류수 수질기준인 20 mg/L 이하에 만족하려면 운전조건을 반송율에 관계없이 HRT 6 hr으로 유지하던가 아니면 HRT 4 hr, 반송율 200% 이상 또는 HRT 8 hr, 반송율 100% 이상으로 유지시켜야 한다. C#3에서도 다른 반송율 비하여 반송율 200%에서 가장 좋은 TN 제거율을 보였다. 특히, HRT 6 hr에서는 반송율에 관계없이 TN 제거율이 약 60% 정도를 보였다. TN 유출수 농도는 강화되는 방류수 수질기준인 20 mg/L 이하에 만족하려면 운전조건을 반송율에 관계없이 HRT 6 hr으로 유지하던가 아니면 HRT 4 hr, 반송율 200% 이상 또는 HRT 8 hr, 반송율 100% 이상으로 유지시켜야 한다.

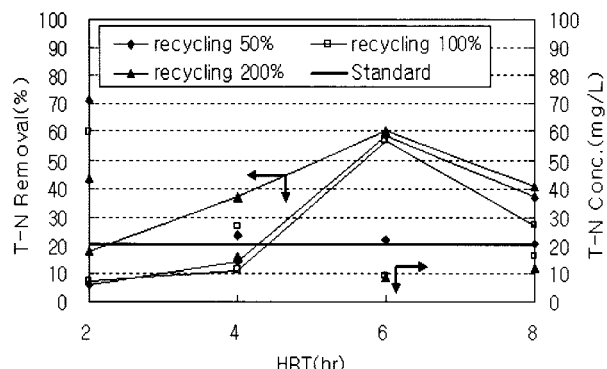
이(1999), 이(2000), 김(2001) 등에 의한 연구에 의하면, 반송율이 증가함에 따라 총질소 제거효율이 증가한다고 보



(a) C#1



(b) C#2



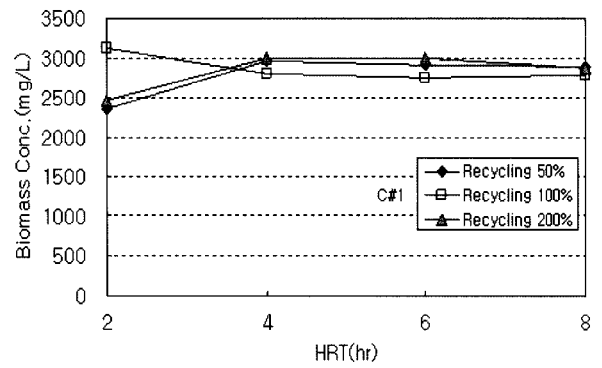
(c) C#3

Fig. 6. TN removal efficiency on HRT.

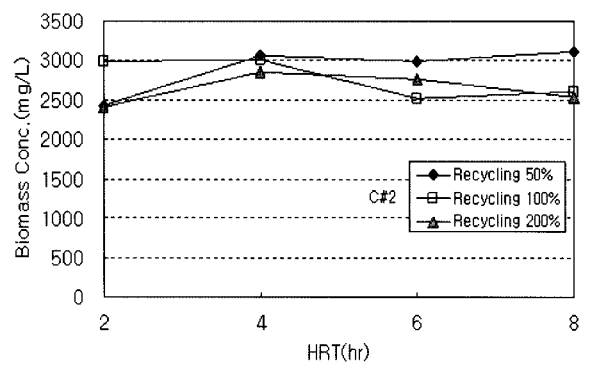
고되었으며, 본 논문도 반송율 200%일 때 가장 좋은 TN 제거율을 보였다. 그러나 반송율을 증가시켜 동력비를 증가시키기보다는 운전조건 중 HRT를 6 hr으로 유지시켜 주는 것이 더욱 효과적이며 강화되는 방류수 수질기준에도 만족할 수 있다.

3.3. 미생물량

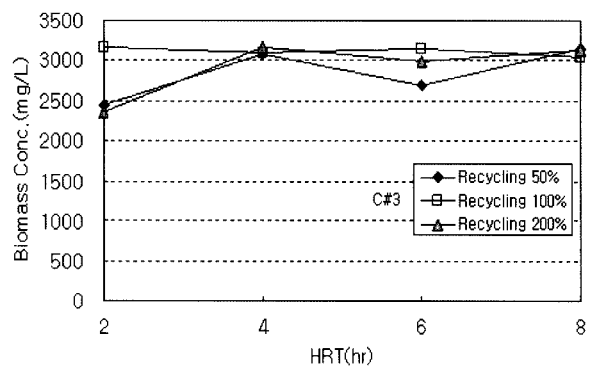
Fig. 7은 HRT에 따른 미생물의 농도를 비교하여 나타내고 있다. Bio-Filter C#1, C#2, C#3를 부착한 각각의 공기부상 반응조내에서의 부유미생물 농도(MLSS) 범위는 2,360~3,160 mg/L로 나타났다. C#1, C#2, C#3의 ALR에서 각각의 평균 미생물 농도는 2,824 mg/L, 2,773 mg/L, 2,956 mg/L로 C#3의 ALR 미생물 농도가 약간 높았다. C#1, C#2, C#3에서 HRT 4 hr 이상으로 운전하여도 미생



(a) C#1



(b) C#2



(c) C#3

Fig. 7. Variation of biomass concentration on HRT.

물 농도가 2,500 mg/L 이상으로 일정하게 유지되어, 미생물들이 유기물질이 갑자기 낮아지거나 높아지는 충격부하나 반송율이 변하는 환경조건에서도 잘 적응하고 있었다. 그러나 HRT 2 hr, 반송율 50, 200%에서는 2,500 mg/L이하로 다소 미생물 농도가 낮았으며, 반송율 100%에서는 높은 미생물 농도 3,120 mg/L를 보였다. HRT 2 hr에서는 HRT 4~6 hr에 비해 BOD 제거율이 낮은 것은 반응조에서 활성탄에 미생물 부착능이 약화되거나 충분한 체류시간을 갖지 못해 유출수에 영향을 준 것으로 판단된다.

4. 결론

공기부상 반응조에 Bio-Filter(Clay(C#1), Glass bead(C#2), Waste plastic (C#3))를 달리 설치하여 반송율과 HRT 변화

에 따른 수처리 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HRT 4 hr, 반송율 100%의 운전조건에서 약 85~90%의 BOD 제거율, 90%이상의 COD 제거율을 갖고 있으며, HRT 6 hr, 반송율 100%의 운전조건으로 체류시간이 증가하면 약 70~90%의 BOD 제거율, 약 70~80%의 COD 제거율로 감소하는 경향이 있다. 처리수의 BOD농도는 여재종류와 HRT에 관계없이 반송율 100%의 운전조건에서 방류수 수질기준 10 mg/L 이하로 만족시킬 수 있었다.
- 2) TN 제거는 여재종류와 반송율에 관계없이 HRT 6 hr으로 유지시켜준다면 강화되는 방류수 수질기준인 20 mg/L에 만족시킬 수 있으며 약 60% 이상의 제거율을 가질 수 있다.
- 3) HRT 4 hr 이상으로 운전시 여재종류와 관계없이 미생물 농도가 2,500 mg/L 이상으로 일정하게 유지되어 환경변화에 민감하지 않았으며, 미생물의 농도가 높을수록 유기물질 제거에 효과적이었다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2004-000-10494-0)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 김병수, 임호주, 한형진, 이수구, 회전형 접촉여재를 이용한 하수의 고도처리시 반송율 변화에 따른 탈질속도와 질산화속도의 관계, *대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집*, **23**(5), pp. 147-149 (2001).
- 김이태, 박준남, 정원식, 송호면, 생물막법을 이용한 저농도 하천 유입하수 처리특성 연구, *대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동 추계학술발표회 논문집*, pp. 233-237 (2002).
- 서용성, Bio-Filter를 이용한 공기부상 반응조에서 유기물 및 질소 제거효율 향상을 위한 공법 연구, *관동대학교 박사학위 논문* (2004).
- 선용호, 충전탑형 무산소/호기 공정에서 반송비에 따른 유기물 및 질소 제거 특성, *한국환경과학회지*, **11**(12), pp. 1261-1265 (2002).
- 이종현, 고은옥, 김미화, 박태주, ICBP(Innocative Compact Biofilm Process) 공법을 이용한 고농도 폐수의 C/N비와 내부반송율이 질소제거에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **21**(8), pp. 1529-1538 (1999).
- 이호경, 권신, 조무환, 외부 반송이 있는 생물활성탄담체(BACC) 공정에 의한 오수 중 질소·인의 동시 제거, *한국생물공학회 춘계학술발표회*, pp. 414-418 (2000).
- 임경진, 순환상 반응조(CBR)를 이용한 폐수처리에 관한 연구, *관동대학교 석사학위 논문* (2001).
- 환경부, 하수도법 시행규칙 제6조, p. 73 (2002).
- APHA, AWWA & WEF., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. (1998).
- Heijnen, J. J., Mulder, A., Formation of Biofilms in a Biofilm Air-lift Suspension Reactor, *Water Sci. Technol.*, **26**(3-4), pp. 647-654 (1992).
- Heijnen, J. J., Van Loosdrecht, M. C. M., Mulder, R., Weltevrede, R. and Mulder, A., Development and Scale-up of an Aerobic Biofilm Air-lift Suspension Reactor, *Wat. Sci. Technol.*, **27**(5/6), pp. 253-261, (1993).
- Mulder, A., Kampt, R. and Eikelboom, D. H., Application of a Three-phase Airlift Reactor for Aerobic Treatment of Domestic Sewage, *3rd Netherlands Biotechnology Congress, Amsterdam*, April 3~4 (1990).
- Sutton, P. M. and Mishra, P. N., Activated Carbon Based Biological Fluidized Beds for Contaminated Water and Wastewater Treatment : A State of Art Review, *Water Sci. Technol.*, **29**(10-11), pp. 309-317 (1994).
- Wood, B. D. and Whitaker, S., Diffusion and Reaction in Biofilms, *Chem. Eng. Sci.*, **53**(3), pp. 397-425 (1998).