

내부 Baffle을 설치한 MBR 공정에서 HRT와 MLSS농도, DO농도 변화가 질소제거 효율에 미치는 영향

The Effects of HRT, MLSS and DO on Nitrogen Removal Efficiency in MBR Process with Internal Baffle

황규대* · 박주영

Gye-Dae Whang* · Joo-Young Park

경희대학교

(2009년 5월 13일 접수 ; 2009년 8월 31일 수정 ; 2009년 9월 4일 채택)

Abstract

Three sets of parallel MBRs (reactor No.1, reactor No.2, reactor No.3) maintaining an MLSS of 4,000 mg/L, 6,000 mg/L and 8,000 mg/L, respectively, were operated to investigate the effect of various HRTs and DO concentration of MBRs on the removal efficiency of organic matters and nitrogen. The HRTs were operated on 4 hr, 6 hr, 8 hr. DO concentrations were ranged 1.5~2.0 mg/L and 0.5~1.0 mg/L respectively on each HRT conditions. MBR was divided into an aerated part and non-aerated part by baffle placed under the water. DO concentrations were controlled by altering the position of baffle. In terms of TSS and CODCr, all systems had a similar level of the removal under varied HRTs and MLSS. TSS removal efficiency was more than 99% and CODCr removal was ranged 94~97% under all conditions. Under the same condition on the HRT and MLSS concentrations, DO concentrations did not affect the organic removal efficiency. On the nitrification efficiency, with high DO concentration, as HRT or MLSS increased, the slight increment of nitrification efficiency was observed. However, under the low DO concentration, increase of MLSS and HRT resulted in larger increase of the nitrification efficiency. At the same HRT and MLSS, the nitrification efficiency increased greatly with up to 16% as DO increased. When the HRT increased from 4hr to 8hr, the denitrification efficiency slightly increased under most of conditions. However, the increase of MLSS resulted in about 19~39% denitrification efficiency increment. MLSS concentrations showed great effect on the denitrification. The increase of the DO concentration at the same HRT and MLSS resulted in decrease of denitrification efficiency with up to 27%. In all systems, the denitrification efficiency had more influence on the TN removal efficiency than nitrification efficiency. So, MLSS concentration has greater effect on the TN removal than HRT and DO. The TN removal efficiency increased as MLSS increased with up to 37%. As a result, the highest TN removal efficiency was observed 79.0% at the condition showed the highest denitrification efficiency that DO of 0.5~1.0 mg/L, an HRT of 8 hr, and 8,000 mg/L of MLSS concentration were maintained.

Key words : Denitrification, Membrane Bio-Reactor(MBR), Nitrification, Simultaneous Nitrification and Denitrification (SND)

주제어 : 탈질반응, MBR공정, 질산화반응, 동시 질산화 탈질반응

* Corresponding author Tel:+82-31-201-2431, Fax:+82-31-201-4589, E-mail: gdwhang@khu.ac.kr(Whang, G.D.)

1. 서론

하수처리장 방류수 수질기준이 강화됨에 따라 활성슬러지 공법으로 운전되고 있는 대부분의 국내 하수처리장은 고도처리시설로의 개선 및 보완이 이루어지고 있다. 고도처리 공정의 생물학적 질소제거 공정은 암모니아성 질소가 질산성 질소로 산화되는 질산화 반응을 포기조에서, 탈질 반응을 무산조에서 이루어지도록 분리하여 구성되어 있다. 질소제거의 첫단계인 질산화반응을 일으키는 질산화 미생물은 온도, pH, 용존산소농도, 유입수 C/N비, 중금속에 민감한 반응을 나타내 질산화 반응을 안정적으로 유지하기 위해서는 생물 반응조의 SRT를 길게 하여 반응조내 미생물 농도를 높게 유지해야 한다. 그러나 SRT를 길게 유지할 경우 슬러지 침강성이 나빠져 침전지에서의 슬러지 유출로 처리수 수질을 악화시킬 수 있다.

분리막 생물반응조(MBR, Membrane Bio-reactor) 공정은 활성슬러지의 침강성에 관계없이 질산화 미생물과 같은 성장속도가 느린 미생물의 농도를 높게 유지함으로써 높은 질산화 효율을 얻을 수 있다. 하지만 질산화 반응이 이루어지는 포기조에서 혼합액을 탈질반응을 위해 무산조로 내부 반응하는데 혼합액의 높은 용존산소 농도가 탈질 반응의 저해 요인으로 작용한다. 질산화와 탈질반응이

단일 반응조에서 이루어지는 동시 질산화 탈질반응(SND, Simultaneous nitrification and denitrification)을 적용한다면 이러한 단점을 보완할 수 있을 것이다. 동시 질산화 탈질 반응에서 가장 중요한 운전인자인 용존산소 농도를 반응조 내에 적절하게 유지하면 미생물 floc내부에 형성되는 용존산소 농도구배에 의해 상대적으로 용존산소 농도가 높은 floc외부에서는 질산화 반응이, 질산화 반응으로 인해 발생한 질산성, 아질산성 질소는 용존산소 농도가 낮은 미생물 floc내부에서 탈질 반응이 일어나 동시 질산화 탈질반응에 의해 질소제거가 이루어질 수 있다는 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되어졌다(한봉석, 2007; Pochana and Keller, 1999; Zhao et al., 1999).

반응조 내 MLSS농도를 높게 유지 할 수 있는 분리막이 침지된 반응조에 분리막 세정을 위한 공기 주입을 유지하며 DO농도와 HRT를 적절히 조절하여 질산화 반응과 탈질 반응을 동시에 유도한다면 높은 질소제거 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 분리막이 침지된 생물 반응조에 분리막이 침지되어 포기가 이루어지는 부분과 포기가 되지 않는 부분으로 분리하기 위해 설치된 Baffle 윗부분과 아래부분으로 내부 순환이 이루어지도록 Baffle이 수면 아래 설치된 MBR 반응조를 운전하여 MLSS농도, HRT, DO농도 변

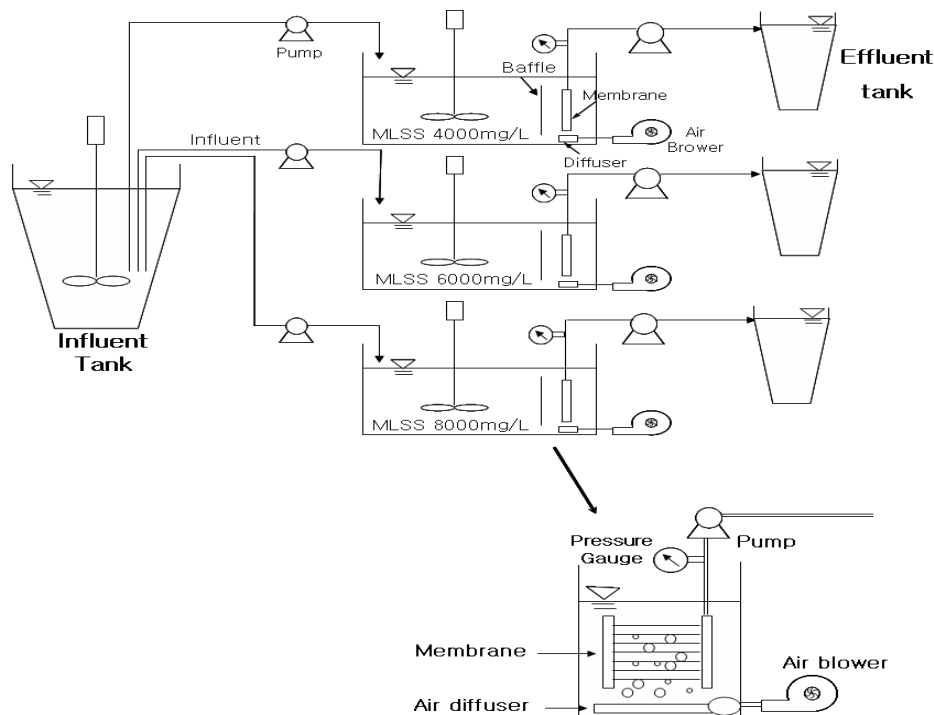


Fig. 1. Schematic diagrams of the MBR with natural internal recycling.

화가 유기물 제거와 암모니아 및 질소제거에 미치는 영향을 분석하여 최적 운전조건을 도출하였다.

2. 연구 방법

2.1 실험 장치

본 연구를 위해 Fig. 1과 같이 용량이 6 L인 장방형 반응조 3개를 투명한 아크릴로 제작하여 운전하였다. 반응조 한편에 분리막을 침지시키고 Baffle을 설치하여 분리막을 침지하고 포기시킨 부분과 분리막이 침지되지 않은 비포기 부분의 용량을 각각 1.2 L, 4.8 L가 되도록 하였다. 반응조에 설치된 Baffle은 반응조 수면하에 위치하여 분리막 하부에 설치된 산기관에서 주입되는 공기에 의해 Baffle 윗 부분과 아래 부분을 통하여 자연스럽게 내부 순환이 일어나도록 하였으며 Baffle의 높낮이를 변화시켜 내부 순환량을 조절하며 분리막이 설치되지 않는 부분의 DO농도가 적정농도로 유지되도록 하였다. 분리막이 침지되지 않는 비포기 부분에는 임펠러를 설치하여 슬러지의 완전혼합을 유도하였다. 또한 분리막의 세척을 위해 약 1 mm의 구멍이 일정한 간격으로 뚫린 지름 10 mm의 아크릴관을 산기관으로 사용하여 공기를 주입하였다. 각 반응조의 유입수 주입과 분리막을 통한 유출수의 흡입은 정량펌프를 이용하였다.

본 연구를 위해 K사에서 생산된 중공사형 PE 재질의 분리막을 사용하였다. 분리막의 내경과 외경은 420 μm , 650 μm 이며 Pore size는 0.23 μm 이다.

2.2 운전방법

분리막이 침지된 생물 반응조에 Baffle을 수중에 설치하여 내부 순환을 유도한 MBR 반응조에 MLSS 농도, HRT, DO 농도 변화가 유기물 제거와 암모니아 제거 및 질소제거에 미치는 영향을 평가하고 적정 운전조건을 도출하기 위해 총 3개의 반응조를 운전하였다. 실험기간 동안 반응조 No.1, No.2, No.3의 MLSS 농도를 평균 4000 mg/L, 6000 mg/L, 8000 mg/L로 일정하게 유지하며 Baffle의 높낮이를 조정하여 모든 반응조의 DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L로

유지하였다. 모든 반응조의 HRT를 4 hr, 6 hr, 8hr로 단계적으로 변화시켜 운전하였다. 첫 번째 단계의 운전이 끝난 후 Baffle의 위치를 상향조정하여 내부순환량을 약 일주일 간 천천히 감소시켜 DO농도를 0.5 ~ 1.0 mg/L로 낮춘 후 두 번째 단계 운전을 시작하였다. 두 번째 단계 운전에서도 모든 반응조의 HRT를 이전단계와 동일하게 변화시켜 운전하여 각 조건에서의 유기물 제거율과 질산화율, 탈질율 및 총 질소제거율을 평가하였다.

2.3 분석 방법

유입수와 각 반응조의 유출수 분석항목은 유기물과 질소 제거율을 평가할 수 있는 TSS, COD_{Cr}, TKN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, NO₂⁻-N을 측정하였고 반응조 내 온도와 용존산소농도 및 pH측정은 측정기기를 이용하였다. 또한 MLSS 농도를 계획된 값으로 유지하기 위하여 각 반응조의 MLSS를 측정하여 매일 일정량의 슬러지를 폐기하였다. 분석 방법은 Standard Methods(APHA et al., 1995)와 수질오염공정시험법에 명시된 방법을 이용하여 실시하였다. 반응조 내 DO농도 측정은 분리막이 침지되지 않는 비포기 부분을 상단과 하단으로 나누어 각단에 6 지점씩 총 12 지점에서 이루어졌으며 12 지점의 평균농도를 운전농도로 하였다.

2.4 유입수 성상

본 연구에 사용된 유입수 시료는 용인시에 소재한 G환경사업소 내로 유입되는 하수를 1 mm screen에 통과시켜 조대 고형물을 제거한 후 NH₄Cl을 적당량 투입하여 암모니아 농도가 40 mg/L로 유지되도록 하였고 암모니아성 질소가 질산화 되는데 소모되는 알카리를 보충하기 위해 NaHCO₃를 적당량 주입하였다. Table 1은 운전기간 동안의 유입수 성상을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물질 제거 특성

분리막이 침지된 생물 반응조에 Baffle을 수중에 설치하

Table 1. Characteristics of domestic wastewater

Phase	Influent Conc., mg/L							
	pH	TSS	TCOD _{Cr}	SCOD _{Cr}	TKN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N
Mean	7.2	180	378.5	84.3	45.1	39.3	0.1	0.25
(Range)	(7.0~7.4)	(162~201)	(362~398)	(70~92)	(41.2~47.5)	(36.2~41.2)	(0.1~0.3)	(0.1~0.6)

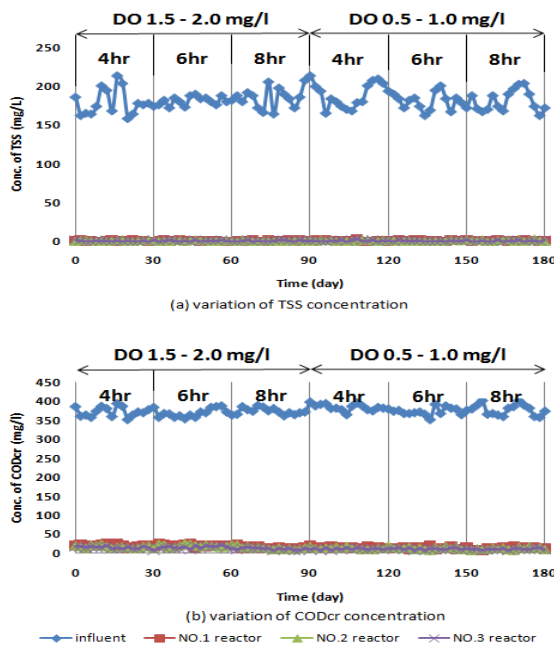


Fig. 2. Variation of organic matter concentrations of influent and effluent of each reactor under various conditions.

여 내부 순환을 유도한 MBR반응조의 MLSS농도를 반응조 번호 No.1, No.2, No.3에 따라 4,000 mg/L, 6,000 mg/L, 8,000 mg/L로 유지하여 운전하였다. 또한 DO농도를 순차적으로 1.5 ~ 2.0 mg/L와 0.5 ~ 1.0 mg/L로 조절하며

각 DO농도조건에서 HRT를 4시간, 6시간, 8시간으로 변화시켜 반응조들을 운전한 결과 유입수와 유출수의 유기물 성장과 각 조건에서 각 반응조의 유기물 제거효율을 Table 2와 Fig. 2에 나타내었다.

DO농도가 1.5 ~ 2.0 mg/L일 때와 0.5 ~ 1.0 mg/L일 때 유입수의 TSS농도는 평균 182.5 mg/L와 183.1 mg/L로 나타났다. 모든 운전조건에서 유출수의 TSS농도는 0.7 ~ 1.2 mg/L이며 TSS 제거율은 고액분리 효율이 높은 분리막이 적용되어 99.4 ~ 99.6%로 99% 이상의 제거율을 보였다.

각 조건에서 유입수의 COD_{Cr}농도는 369.0 ~ 380.7 mg/L의 범위를 나타내었으며 HRT 4시간, 6시간, 8시간일 때 평균 COD_{Cr} 부하량은 1.13 ~ 2.24 kgCOD_{Cr}/m³·day으로 나타났다. 또한 단위 미생물량당 COD_{Cr}의 부하량은 0.14 ~ 0.55 kgCOD_{Cr}/kgMLSS·day 범위로 나타났다. 모든 운전조건에서 각 반응조의 COD_{Cr}제거율은 94.3 ~ 97.2%의 높은 제거율을 보였으며 HRT와 MLSS농도가 증가함에 따라 단위 미생물량당 유기물 부하량이 감소하여 제거율이 약간 증가하여 HRT와 MLSS농도가 COD_{Cr}의 제거에 영향을 미치는 것으로 나타났으나 그 정도는 미미한 것으로 관찰되었다. HRT를 6시간 이상으로 반응조 체적당 유기물 부하를 1.51 kgCOD_{Cr}/m³·day 이하로 운전한 경우 COD_{Cr}제거율은 MLSS농도와 DO농도에 관계없이 96% 이상을 나타내었다. HRT와 MLSS농도를 동일하게 유지한 반응조의 DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L와 0.5 ~ 1.0 mg/L로

Table 2. Experimental results of organic matter removal in each reactor in various conditions.

Phase	HRT	Reactor	TSS(mg/L)			COD _{Cr} (mg/L)		
			Influent	Effluent	Re(%)	Influent	Effluent	Re(%)
DO conc, 1.5~2.0(mg/L)	4hr	No.1		0.8	99.6		20.3	94.6
		No.2	178.9	0.9	99.5	372.8	17.1	95.4
		No.3		0.7	99.6		14.6	96.1
	6hr	No.1		0.8	99.6		15.0	96.0
		No.2	181.8	0.8	99.6	378.6	13.3	96.5
		No.3		0.8	99.6		11.4	97.0
	8hr	No.1		0.9	99.5		13.2	96.5
		No.2	186.7	0.7	99.6	375.0	11.8	96.9
		No.3		0.9	99.5		10.8	97.1
DO conc, 0.5~1.0(mg/L)	4hr	No.1		0.9	99.5		21.2	94.3
		No.2	186.4	0.9	99.5	369.0	20.1	94.6
		No.3		1.2	99.4		15.6	95.8
	6hr	No.1		0.9	99.5		14.8	96.1
		No.2	178.9	0.9	99.5	380.7	13.8	96.4
		No.3		0.7	99.6		11.6	97.0
	8hr	No.1		1.0	99.5		13.6	96.4
		No.2	184.1	1.1	99.4	378.3	11.8	96.9
		No.3		0.9	99.5		10.7	97.2

변화시켜 운전하였을 때 유출수 COD_{Cr}농도는 큰 차이를 보이지 않아 DO농도는 COD_{Cr}제거율에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다. DO농도가 1.5 ~ 2.0 mg/L, MLSS농도가 4,000 mg/L인 No.1반응조의 COD_{Cr}제거율은 HRT를 4시간으로 한 운전조건에서 94.6%였으며 HRT를 8시간으로 조절하였을 때는 96.5%를 나타내었으나 MLSS농도를 8,000 mg/L로 유지한 No.3반응조에서는 동일한 DO농도에서 HRT가 4시간과 8시간이었을 때 COD_{Cr}제거율이 각각 96.1%와 97.1%를 나타내 MLSS농도가 높은 반응조에서 HRT변화에 따른 COD_{Cr}제거율 변화는 MLSS농도가 낮은 반응조보다 적은 것으로 나타났다.

한봉석(2007)은 HRT 4시간, DO농도 1.5 ~ 2.0 mg/L로 유지한 활성슬러지 공정에 담체를 충전하여 SND를 통한 질소제거 실험에서 TSS와 COD_{Cr}의 단위 미생물량당 유입 부하량이 각각 0.4 kgTSS/kgMLSS · day, 0.7 kgCOD_{Cr}/kgMLSS · day이 되도록 하수를 주입한 결과 90 %, 88 %의 TSS, COD_{Cr}의 제거율을 얻었다고 보고하였는데 담체를 충전하여 미생물의 농도가 높게 유지되었지만 입자상 유기물의 유출로 분리막을 이용한 본 실험의 제거율보다는 낮은 것으로 나타났다. Holakoo 등(2006)은 MLSS농도를 11,000 mg/L, 반응조 내 DO농도는 2.0 ~ 3.0 mg/L로 유지하고 분리막이 침지된 활성슬러지 반응조의 HRT를 4시간으로 유지하며 단위 미생물량당 COD_{Cr} 부하량이 0.2 kgCOD_{Cr}/kgMLSS · day로 유지하여 반응조를 운전한 결과 97%의 유기물 제거율을 얻었다고 보고하였다. 본 실험보다 높은 MLSS농도를 유지하여 단위 미생물량당 유기물 부하량을 낮게 유지하고 유기물 분해가 용이한 합성폐수를 유입수로 주입하였기 때문에 높은 유기물 제거율을 얻은 것으로 판단된다.

동일한 MLSS농도와 HRT 조건에서 DO농도변화에 따른 유기물의 제거효율의 차이는 크게 나타나지 않아 적용된 DO농도변화가 유기물 제거효율에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 관찰되었으며 HRT와 MLSS농도증가에 따라 제거율이 약간 증가하였으나 그 증가폭은 HRT와 MLSS농도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

3.2 질소 제거 특성

3.2.1 DO농도 1.5 ~ 2.0 mg/L일 때 HRT와 MLSS농도변화에 따른 질소제거율

DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L로 유지하며 운전한 기간 동안 유입수의 평균 TKN농도는 45.3 ~ 46.0 mg/L의 범위를 나타내었으며 평균 NH₄⁺-N농도는 39.2 ~ 39.6 mg/L로 나타났다. 반응조의 평균 TKN 부하량은 HRT에 따라 0.14 ~ 0.28 kgTKN/m³ · day로 유지되었다. 또한 단위 미생물

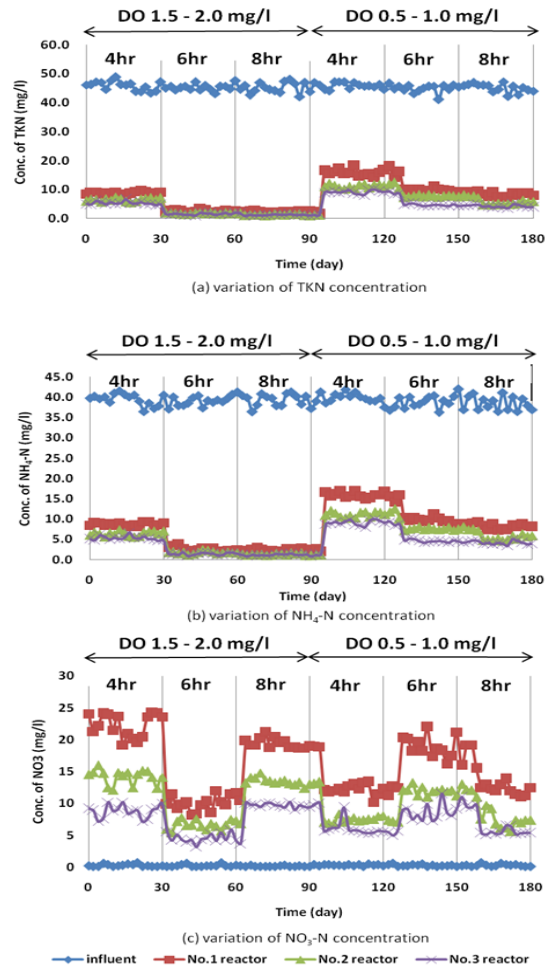


Fig. 3. Variation of TKN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N concentrations of influent and effluent of each system under various conditions.

량당 TKN 부하량은 HRT와 MLSS농도에 따라 0.02 ~ 0.07 kgTKN/kgMLSS · day의 범위를 나타내었으며 COD/TKN비는 8.10 ~ 8.42의 범위를 유지하였다.

운전조건 변화에 따른 각 반응조의 유입수와 유출수의 평균 TKN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N농도를 Table 3과 Fig. 3에 나타내었다. 이와 같은 결과를 토대로 각 반응조에서 제거된 암모니아성 질소의 대부분이 세포동화작용이 아닌 질산성 질소로 전환된다고 가정하여 질산화율과 탈질율은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Nitrification efficiency} = \frac{\text{TKN}_{\text{inf}} - \text{NH}_4\text{-N}_{\text{eff}}}{\text{TKN}_{\text{inf}}} \quad (1)$$

$$\text{Denitrification efficiency} = \frac{\text{TKN}_{\text{inf}} - (\text{NH}_4\text{-N}_{\text{eff}} + \text{NO}_3\text{-N}_{\text{eff}} + \text{NO}_2\text{-N}_{\text{eff}})}{\text{TKN}_{\text{inf}} - \text{NH}_4\text{-N}_{\text{eff}}} \quad (2)$$

위의 계산식을 이용하여 산출된 질산화율, 탈질율, 총 질소 제거율을 Fig. 4에 나타내었다. DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L, 반응조의 HRT를 4시간으로 유지하며 운전한 기간 동안 MLSS농도가 4,000 mg/L, 6,000 mg/L, 8,000 mg/L인 반응조 No.1, No.2, No.3의 질산화율은 각각 81.1%, 85.9%, 88.5%로 나타났다. 단위 미생물량당 COD와 TKN 부하가 각각 0.55 kgCOD_{Cr}/kgMLSS · day, 0.07 kgTKN/kgMLSS · day로 가장 높은 반응조 No.1에서 가장 낮은 질산화율을 보였으며 반응조 번호에 따라 MLSS농도가 증가할수록 단위 미생물량당 부하가 감소하여 질산화율은 증가하였다. 김태경(2006)은 HRT 4시간, MLSS 3,000 mg/L로 유지한 활성슬러지 반응조에 COD_{Cr}과 TKN 부하량이 1.8 kgCOD_{Cr}/m³ · day, 0.218 kgTKN/m³ · day가 되도록 하수를 주입하여 운전한 결과 83%의 질산화율을 얻었으며 90% 이상의 질산화율을 얻으려면 HRT를 증가시켜 COD와 TKN부하를 감소시켜야 한다고 보고하였다. 김태경(2006)의 연구결과 나타난 질산화율과 MLSS농도를 4,000 mg/L, HRT를 4시간으로 유지하여 COD부하가 2.23 kgCOD_{Cr}/m³ · day로 운전된 No.1 반응조의 질산화율이 비슷하게 나타나 질산화율을 더 높이기 위해서는 HRT

를 길게 유지하여야 할 것으로 판단된다. HRT를 6시간으로 하였을 때 각 반응조에서 질산화율은 94.5%, 96.2%, 96.9%로 나타났으며 HRT를 8시간으로 운전하였을 때 질산화율은 95.1%, 97.2%, 97.4%로 나타났다. 김태경(2006)의 연구결과와 같이 HRT 6시간과 8시간에서의 질산화율은 COD_{Cr}과 TKN부하가 감소되어 90% 이상을 나타내었다. 비록 일반 활성슬러지공정에서보다 DO농도가 낮게 유지되었지만 HRT가 길게 그리고 반응조 내의 MLSS농도 역시 높게 유지되어 COD와 TKN부하가 각각 1.51 kgCOD_{Cr}/m³ · day와 0.18 kgTKN/m³ · day 이하로 운전되었기 때문에 90% 이상의 높은 질산화율을 얻을 수 있었던 것으로 판단된다. 또한 HRT 4시간으로 유지하여 운전하였을 때 보다 HRT를 6시간, 8시간으로 증가하였을 때 각 반응조의 질산화율은 약 8 ~ 14% 증가하였으며 MLSS농도가 다른 반응조에 비해 낮게 유지된 No.1 반응조에서 HRT증가에 따라 질산화율의 증가가 가장 크게 나타났다. 하지만 HRT가 6시간에서 8시간으로 증가하였을 때 각 반응조의 질산화율은 약 1 ~ 2% 정도 증가하였다. 동일한 HRT조건에서 질산화율은 반응조 MLSS농도가 증가함에 따라 약 2.3 ~ 7.4% 증가하였으며 HRT가 4시간인 운전조건에서 가장 높은 증가폭을 나타내었다. HRT를 6시간, 8시간으로 운전하였을 때 반응조 No.1과 No.3의 질산화율 차이는 동일하게 약 2.4%로 나타나 미생물 농도변화는 질산화율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다. 이수철

Table 3. Experimental results of nitrification and denitrification, T-N removal rates at each reactor under various Conditions.

Phase	HRT	Reactor	TKN(mg/L)		NH ₄ ⁺ -N(mg/L)		NO ₃ ⁻ -N(mg/L)		Nitrification rate(%)	Denitrification rate(%)	T-N removal(%)
			influent	effluent	influent	effluent	influent	effluent			
DO conc, 1.5~2.0 (mg/L)	4hr	No.1		8.8		8.7		22.4	81.1	39.3	32.2
		No.2	46.0	6.5	39.6	6.5	0.3	14.2	85.9	63.4	54.8
		No.3		5.3		5.3		8.8	88.5	78.0	69.3
	6hr	No.1		2.5		2.5		19.4	94.5	54.3	51.6
		No.2	45.3	2.0	39.2	1.7	0.2	13.4	96.2	68.8	66.1
		No.3		1.8		1.4		9.7	96.9	77.5	74.8
	8hr	No.1		2.3		2.2		18.4	95.1	56.6	54.1
		No.2	45.3	1.3	39.3	1.3	0.2	12.0	97.2	72.3	70.5
		No.3		1.2		1.2		9.0	97.4	79.1	77.1
DO conc, 0.5~1.0 (mg/L)	4hr	No.1		15.8		15.8		10.1	65.5	65.9	43.2
		No.2	45.8	11.3	39.5	11.3	0.3	6.6	75.4	80.5	60.8
		No.3		9.1		9.1		4.3	80.1	87.8	70.0
	6hr	No.1		9.7		9.6		12.2	78.8	65.2	51.5
		No.2	45.1	7.7	39.3	7.6	0.3	7.5	83.2	79.5	66.3
		No.3		4.6		4.6		6.0	89.9	84.7	76.3
	8hr	No.1		8.2		8.1		11.7	82.1	67.8	55.8
		No.2	45.3	5.3	38.9	5.3	0.3	7.4	88.4	81.1	71.9
		No.3		3.9		3.9		5.5	91.4	86.3	79.0

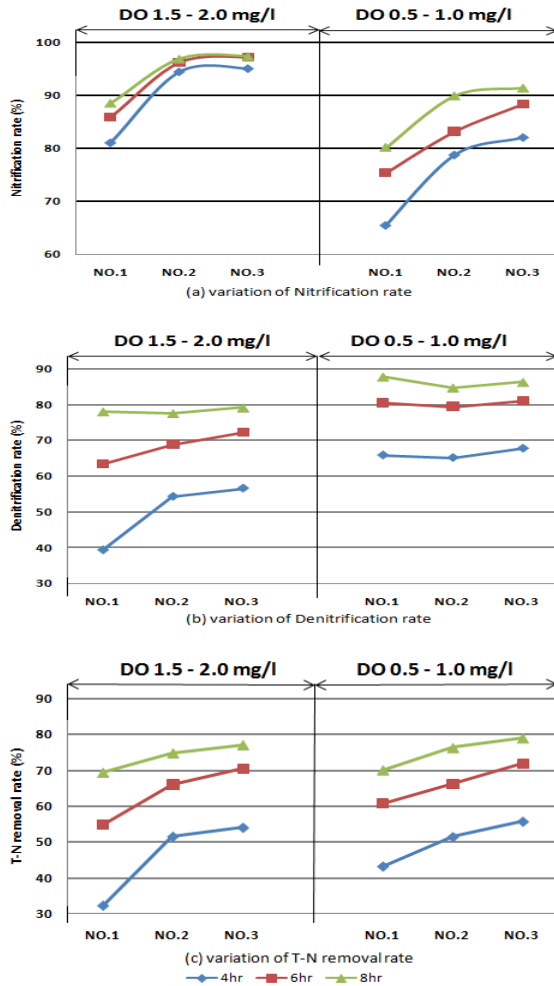


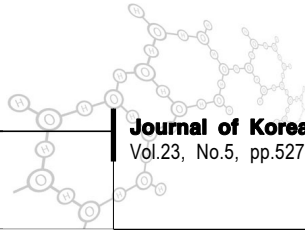
Fig. 4. Variation of Nitrification rate, Denitrification rate and T-N removal rates at each reactor under various conditions.

등(2000)은 단위 미생물량당 TKN 유입 부하량이 0.02 kgTKN/kgMLSS · d로 유지한 분리막을 침지한 활성슬러지 공정을 운전한 결과 본 연구결과와 비슷한 약 90% 이상의 질산화율을 얻었다고 보고하였다.

HRT를 4시간으로 운전하였을 때 각 반응조의 탈질율은 반응조 번호에 따라 각각 39.3%, 63.4%, 78.0%로 나타났다. 또한 HRT를 6시간으로 운전한 경우 54.3%, 68.8%, 77.5%의 탈질율을 나타냈으며 HRT가 8시간인 경우 56.6%, 72.3%, 79.1%의 탈질율을 나타내었다. MLSS농도가 높을수록 탈질율이 높게 나타나 반응조 내 MLSS농도가 탈질율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 반응조 내 MLSS농도가 높을수록 미생물에 의한 내생탈질작용이 활발히 일어나기 때문으로 판단된다. 그러나 HRT 6시

간, 8시간의 운전조건에서 반응조 MLSS농도 증가에 따른 탈질율의 증가폭은 감소하는 것으로 나타나 HRT가 길게 운전된 경우 MLSS농도가 탈질에 미치는 영향은 감소하는 것으로 관찰되었다. MLSS농도를 4,000 mg/L로 유지한 반응조 No.1의 경우 HRT를 4시간에서 6시간, 8시간으로 증가시키기에 따라 탈질율을 각각 39.3%에서 54.3%, 56.6%로 증가하여 No.2, No.3 반응조보다 HRT증가에 따른 탈질율의 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 탈질반응은 생물학적 탈질과정 동안 2단계의 탈질단계가 동시에 일어난다고 보고되었는데 첫 번째 단계는 유입수의 Readily biodegradable COD(RBCOD)가 소모되는 탈질반응으로 탈질반응이 빠르게 일어나며 두 번째 단계는 Slowly biodegradable COD(SBCOD)가 소모되는 탈질반응으로 SBCOD가 가수분해되어 생성된 RBCOD에 의해 탈질반응이 일어나기 때문에 탈질반응이 느리게 일어난다고 보고되었다(Ekama and Marais, 1984). HRT 4시간의 조건에서 No.1 반응조가 낮은 탈질율은 보인 것은 SBCOD가 RBCOD로 충분히 전환되지 못했을 뿐 아니라 MLSS농도가 낮아 내생탈질에 의한 질소제거가 충분하지 못했기 때문으로 사료된다. 하지만 HRT에 따라 미생물량당 COD와 TKN부하가 각각 0.14 ~ 0.28 kgCOD_{Cr}/kgMLSS · day과 0.02 ~ 0.03 kgTKN/kgMLSS · day의 범위에서 운전된 반응조 No.3는 HRT 4시간에서 78.0%의 탈질율을 보였으며 6시간, 8시간으로 증가시켜 운전하였을 때 탈질율은 77.5%, 79.1%로 HRT가 증가하였음에도 반응조 No.1에서와 같은 탈질율의 증가가 나타나지 않았다. 이는 MLSS농도가 고농도로 유지되어 낮은 HRT에서도 유기물이 탈질반응에 충분히 소비되어 HRT증가에도 큰 변화를 나타내지 않은 것으로 판단된다.

총 질소제거율은 HRT를 4시간으로 운전하였을 때 반응조 No.1, No.2, No.3는 각각 32.2%, 54.8%, 69.3%로 나타났다. 또한 HRT를 6시간으로 운전하였을 때 총 질소제거율은 반응조 번호에 따라 각각 51.6%, 66.1%, 74.8%, HRT 8시간일 때 54.1%, 70.5%, 77.1%를 보였다. 질소제거율의 경향은 탈질율과 비슷한 경향을 나타내었다. 반응조 No.1의 질소제거율보다 반응조 No.2와 No.3의 질소제거율이 각각 15 ~ 23%, 23 ~ 37% 높게 나타나 MLSS농도가 질소제거율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. HRT가 4시간에서 MLSS농도 증가에 따른 탈질율 증가폭이 크게 나타났으며 HRT가 6시간, 8시간으로 증가됨에 따라 MLSS농도 증가에 따른 탈질율 증가폭은 감소하는 것으로 나타났다. MLSS농도와 HRT가 증가함에 따라 질소제거율은 증가하는 것으로 나타났지만 그 증가폭은 MLSS농도와 HRT 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 또한 MLSS농도증가로 인한 질소제거율의 증가폭이 HRT증가에 의한



증가폭보다 크게 나타나 MLSS농도가 HRT보다 질소제거율에 미치는 영향이 큰 것으로 조사되었다.

3.2.2 DO농도 0.5 ~ 1.0 mg/L일 때 HRT와 MLSS에 따른 질소제거율

DO농도를 0.5 ~ 1.0 mg/L로 운전하였을 때 유입수의 평균 TKN농도는 45.1 ~ 45.8 mg/L의 범위를 나타내었으며 평균 NH_4^+-N 농도는 38.9 ~ 39.5 mg/L로 나타났다. 반응조의 평균 TKN 부하량은 HRT가 4시간, 6시간, 8시간일 때 0.14 ~ 0.27 kgTKN/m³ · day의 범위를 유지하였다. 또한 반응조 내 단위미생물량당 TKN 부하량은 반응조 HRT와 MLSS농도에 따라 0.02 ~ 0.07 kgTKN/kgMLSS · day로 유지되어 운전기간 동안 유입수의 COD_{Cr}/TKN 비는 8.06 ~ 8.44를 나타내었다.

MLSS농도를 각각 4,000 mg/L, 6,000 mg/L, 8,000 mg/L로 유지한 반응조들의 질산화율은 HRT를 4시간으로 유지하였을 때 각각 65.5%, 75.4%, 80.1%로 산출되었다. HRT 4시간에서 모든 반응조에서 80% 이하의 낮은 질산화율을 보였다. HRT를 6시간으로 증가시켰을 때 각 반응조의 질산화율은 78.8%, 83.2%, 89.9%로 나타났으며 HRT를 8시간으로 운전하였을 때 82.1%, 88.4%, 91.4%로 나타났다. HRT가 증가함에 따라 TKN부하가 감소하여 질산화율은 11 ~ 17% 높게 나타났으나 HRT가 4시간에서 6시간으로 증가함에 따른 질산화율 증가폭에 비해 HRT 6시간에서 8시간으로 증가에 따른 질산화율 증가폭은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. MLSS농도가 증가함에 따라 질산화 미생물량도 증가하여 질산화율은 최대 약 15% 정도 증가되었으나 그 증가폭은 MLSS 농도가 증가함에 따라 감소하였다. DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L로 유지하였을 때보다 질산화율은 전체적으로 6 ~ 16% 감소하는 것으로 나타나 DO농도 감소가 질산화율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 그 감소폭은 MLSS농도가 증가할수록 감소하여 높은 MLSS농도는 DO농도가 질산화율에 미치는 영향을 상쇄하는 것으로 관찰되었다. DO농도가 감소함에 따라 질산화율이 낮게 나타난 것은 반응조 미생물의 floc내 DO농도 구배가 크지 못해 미생물 floc내로의 용존산소 확산 flux가 감소하여 용존산소가 floc내로의 전달이 잘 이루어지지 않아 유기물과 용존산소를 소비함에 있어 성장 속도가 빠른 종속영양 미생물이 성장속도가 느린 독립영양미생물인 질산화 미생물을 우점하게 되어 질산화 미생물의 산소 이용이 원활하지 못했기 때문으로 사료된다(Pochana and Keller, 1999).

반응조 No.1, No.2, No.3의 HRT를 4시간으로 운전하였을 때 탈질율은 각각 65.9%, 80.5%, 87.8%로 나타났으며 HRT 6시간에서는 각각 65.2%, 79.5%, 84.7%로 나타났

다. 또한 HRT를 8시간으로 운전한 경우 각 반응조의 탈질율은 67.8%, 81.1%, 86.3%로 나타났다. HRT증가에 따라 각 반응조의 탈질율은 크게 증가하지 않았다. MLSS농도가 4,000 mg/L에서 6,000mg/L로 증가함에 따라 탈질율은 최대 약 14% 높게 나타났다. 하지만 MLSS농도가 6,000 mg/L에서 8,000 mg/L로 증가하여도 탈질율은 약 5% 높아져 증가폭이 감소하는 것으로 나타났다. HRT 증가에 따른 탈질율의 증가폭보다 MLSS농도 증가에 따른 탈질율의 증가폭이 크게 나타나 MLSS 농도가 탈질율에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L로 유지한 반응조들의 탈질율과 비교하여 탈질율은 모든 반응조에서 7 ~ 27% 높게 나타났으나 HRT를 길게 MLSS농도를 높게 유지할 경우 그 증가폭이 적은 것으로 나타났다. 낮은 DO농도에서 탈질율이 높게 나타난 것은 유기물을 기질로 사용하는 종속영양미생물이 유기물 산화과정에서 최종 전자수용체로 용존산소 대신 질산성 질소를 사용하였기 때문이다.

반응조 No.1, No.2, No.3의 총 질소제거율은 HRT를 4시간으로 운전하였을 때 43.2%, 60.8%, 70.0%로 나타났으며 HRT를 6시간으로 하였을 때 51.5%, 66.3%, 76.3%로 나타났다. 또한 HRT를 8시간으로 증가하였을 때 각 반응조의 질소제거율은 55.8%, 71.9%, 79.0%로 나타났다. HRT와 MLSS농도가 증가할수록 질소제거율은 증가하는 것으로 나타났으나 HRT를 길게, MLSS농도를 높게 유지한 조건에서는 그 증가폭이 감소하였다. HRT가 4시간으로 운전하였을 때 비해 8시간으로 운전하였을 때 총 질소제거율은 약 9 ~ 12% 높게 나타났다. 또한 MLSS농도가 4,000 mg/L에서 6,000 mg/L로 증가하였을 때 질소제거율은 15 ~ 17% 높게 나타났으며 8,000 mg/L로 MLSS농도가 증가하였을 때 최대 약 27% 높은 질소제거율을 보여 상대적으로 MLSS농도의 증가에 따른 질소제거율의 증가폭이 HRT 증가에 따른 질소제거율의 증가폭에 비해 크게 나타나 MLSS 농도가 HRT보다 질소제거율에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L에서 0.5 ~ 1.0 mg/L로 감소시켜 운전하였을 때 총 질소제거율은 HRT를 4시간으로 운전한 반응조 No.1에서 11%, No.2에서 5% 높게 나타났지만 그 외 조건에서는 0 ~ 2% 정도 높게 나타나 DO농도 변화에 따른 총 질소제거율은 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만 비슷한 총 질소제거율을 나타내어도 유출수의 성상에 차이를 나타냈는데 DO농도가 1.5 ~ 2.0 mg/L일 때에는 질산화율이 높는데 반해 탈질율이 상대적으로 낮아 유출수 내 총 질소농도 중 NO_3^--N 이 차지하는 비중이 높게 나타내며 DO농도가 0.5 ~ 1.0 mg/L일 때에는 상대적으로 낮은 질산화율을 보이지만 높은 탈질율을 보여 유출수 내 총 질소농도 중 NH_4^+-N 이 차지하는 비중이 높게 나타났다.

How 등(2004)은 분리막을 침지한 활성슬러지 반응조의 HRT를 6시간으로 유지하고 단위 미생물량당 COD_{Cr} 과 TKN의 부하량이 각각 $0.29 \text{ kgCOD}_{Cr}/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$, $0.03 \text{ kgTKN}/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$ 가 되도록 합성폐수를 주입한 결과 본 연구결과보다 높은 99%의 질산화율을 얻을 수 있었다고 보고하였다. Acetate를 탄소원으로 사용하고 분리막을 침지하여 MLSS농도를 높게 유지하여 질산화 미생물의 양을 높게 유지하였고 DO농도를 9.0 mg/L 로 매우 높게 유지하였기 때문에 높은 질산화율을 얻은 것으로 사료된다. Holakoo 등(2006)은 분리막이 침지된 활성슬러지 반응조의 MLSS농도를 $11,000 \text{ mg/L}$, HRT를 4시간으로 운전하고 단위 미생물량당 COD_{Cr} 과 NH_4^+ 의 부하량이 각각 $0.17 \text{ kgCOD}_{Cr}/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$, $0.01 \text{ kgNH}_4^+/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$ 인 합성폐수를 주입하며 DO농도를 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$, $1.0 \sim 2.0 \text{ mg/L}$, $2.0 \sim 3.0 \text{ mg/L}$ 로 증가시켜 운전한 결과 질산화율은 각각 86%, 96%, 98%, 탈질율은 50%, 43%, 34%, 총 질소제거율은 45%, 42%, 32%를 얻었다고 보고하였다. 본 실험 중 MLSS농도를 $8,000 \text{ mg/L}$ 으로 유지한 반응조 No.3의 HRT 4시간 조건의 운전결과와 비교해 낮은 탈질율과 총 질소제거율을 보였다. MLSS농도를 높게 유지하였음에도 탈질율이 증가하지 않은 것으로 보아 유입수 COD/TKN 비가 크게 증가하지 않는 한 MLSS농도를 $8,000 \text{ mg/L}$ 이상으로 증가시켜도 탈질율은 크게 증가하지 않을 것으로 사료된다. DO농도가 증가할수록 질산화율은 2 ~ 12% 증가하였으나 탈질율은 7 ~ 16% 감소하고 총 질소제거율도 감소하여 본 연구결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 한봉석(2007)은 활성슬러지 공정에 담체를 충전한 반응조의 HRT를 4시간, DO농도를 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg/L}$ 로 유지하고 유입 COD_{Cr} , TKN 부하량을 각각 $2.0 \text{ kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$, $0.281 \text{ kgTKN}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 가 되도록 생활하수를 주입한 결과 86.7%의 질산화율과 79.2%의 탈질율을 얻었다고 보고하였다. 담체를 충전함으로써 반응조 내 미생물량을 많게 유지할 수 있었고 담체 내 생성된 생물막 내부의 DO농도 구배에 의해 탈질 반응이 원활히 발생하여 높은 탈질율을 얻을 수 있었다고 하였다. 본 연구에서 반응조 No.3을 HRT 4시간, DO농도 $1.5 \sim 2.0 \text{ mg/L}$ 로 운전하였을 때와 비슷한 결과를 나타냈다. 반응조의 MLSS농도를 높게 유지한 경우 담체를 투입한 것과 비슷한 효과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 박종일 등(2007)은 활성슬러지 반응조에서 MLSS농도 $1,800 \sim 2,200 \text{ mg/L}$, DO농도 0.5 mg/L , HRT 24시간으로 운전하며 COD 농도 200 mg/L , TN농도 28 mg/L 로 C/N비가 약 7.1인 합성폐수를 주입하였을 때 60%의 질소제거율을 나타내었다고 보고하였다. HRT 4시간, DO농도를 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg/L}$ 로 운전한 반응조 No.2의 질소제거율과 비슷하게 나

타나 MLSS농도를 높게 유지하였을 때에는 짧은 HRT로도 탈질율이 원활히 일어나 비슷한 총 질소제거율을 나타낸 것이라 생각된다.

엄태규 등(2002)은 HRT를 8.7시간으로 유지한 MLE공정에서 단위 미생물량당 COD_{Cr} 과 NH_4^+ 의 부하량이 각각 $0.25 \text{ kgCOD}_{Cr}/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$, $0.05 \text{ kgNH}_4^+/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$ 가 되도록 합성폐수를 주입하여 88%의 탈질율을 얻었다고 보고하였다. 정용철 등(2005)은 HRT를 7.7시간으로 유지한 MLE공정의 포기조에 분리막을 침지하여 단위 미생물량당 COD 와 TKN의 부하량을 각각 $0.1 \text{ kgCOD}/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$, $0.02 \text{ kgTKN}/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$ 가 되도록 하수를 주입하여 98%의 질산화율과 82%의 탈질율을 얻어 80%의 총 질소제거율을 얻었다고 보고하였다. Rodger와 Zhan(2004)은 HRT 8시간의 MLE공정에서 COD , TKN부하가 $1.46 \text{ kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$, $0.23 \text{ kgTKN}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 로 유지되도록 유입수를 주입하여 최대 82%의 질소제거율을 나타내었다고 보고하였다. 본 연구의 결과와 같은 동시 질산화 탈질 공정의 질소제거효율은 DO농도와 HRT 및 MLSS농도 등 운전조건에 따라 비슷하거나 높게 나타날 경우도 있지만 대체로 80% 이하로 나타나 무산소조와 호기조로 분리된 MLE 공정보다 비슷하거나 낮은 것으로 나타났다. 무산소조와 호기조로 분리된 공정은 탈질 반응이 일어나는 무산소조와 질산화 반응이 일어나는 호기조로 분리되어 각 반응의 조건을 적절히 맞춰 운전할 수 있다. 반면 동시 질산화 탈질반응은 유기물, 용존산소, NH_4^+-N 이 혼합된 상태에서 질산화반응과 탈질반응이 동시에 이루어지도록 운전해야 한다. 유기물과 NH_4^+-N 가 산화되기 위해서는 용존산소와 함께 미생물 플록이나 생물막 내부로 확산되어야 한다. 동시 질산화 탈질반응이 일어나기 위해서는 미생물 플록이나 생물막 내부로 유기물과 용존산소, NH_4^+-N , $NO_3^- -N$ 이 화학양론식의 몰비에 맞게 확산되어 공급되어야 한다. Williamson와 McCarty(1976)는 1 mg 의 NH_4^+-N 가 산화하기 위한 산소량은 4.5 mg 이며 NH_4^+-N 과 산소의 확산계수는 각각 $1.5 \text{ cm}^2/\text{d}$, $2.2 \text{ cm}^2/\text{d}$ 이므로 화학반응식의 몰비와 확산계수에 따라 NH_4^+-N 가 산화하기 위해 요구되는 산소공급량은 반응조 내 NH_4^+-N 농도의 약 2.7배로 유기물에 비해 매우 크기 때문에 입자크기가 작고 미생물에 의해 분해가 잘 일어나는 확산계수가 큰 유기물이 우선 산소와 반응하게 되어 산화되고 이후 NH_4^+-N 가 잔류 산소와 반응하여 질산화 반응이 일어난다. Levine 등(1985)은 입자크기에 따라 유기물의 확산계수가 다르기 때문에 입자 크기가 작으면 작을수록 확산계수가 크고, 미생물에 의해 분해도 빨리 일어날 것이라고 보고하였다. 그 다음 질산화 반응에 의해 생성된 $NO_3^- -N$

는 입자크기가 크고 확산계수가 작은 잔류 유기물과 반응하여 탈질반응이 일어나는데 이때 유기물이 충분하게 공급되지 못해 탈질반응이 더더 질소제거율이 낮게 나타났을 것이라 예상된다. 그러나 무산소조와 호기조가 분리된 공정에서는 유입수가 무산소조로 주입되기 때문에 유입수 내에 존재하는 입자크기가 작고 확산계수가 커 미생물과 반응이 잘 일어나는 유기물이 공급되어 원활한 탈질반응을 유도할 수 있고 호기조에서 높은 용존산소 농도를 유지할 수 있기 때문에 잔류 유기물과 NH_4^+-N 의 산화반응이 원활히 일어난다. 본 연구의 결과보다 높은 질소제거율을 나타낸 것으로 사료된다. 하지만 무산소조와 포기조로 분리된 공정은 호기조에서 생성된 질산성 질소를 무산소조로 내부 반송하는 과정에서 용존산소가 함께 유입되어 탈질 효율을 감소시키고 높은 질소제거율을 얻기위해 내부반송율을 증가시키면 호기조의 수리학적 체류시간을 감소시켜 원하는 질산화율을 얻기 어려운 문제점이 있다.

4. 결론

분리막이 침지된 생물 반응조에 Baffle을 수면 밑에 설치하여 포기가 이루어지는 부분과 포기가 되지 않는 부분으로 나뉜 MBR 반응조를 운전하여 MLSS농도(4,000 mg/L, 6,000 mg/L, 8,000 mg/L), DO농도(1.5~2.0 mg/L, 0.5~1.0 mg/L), HRT(4시간, 6시간, 8시간) 변화가 유기물 제거와 암모니아 제거 및 질소제거에 미치는 영향을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 단위 미생물량당 COD_{Cr} 의 유입 부하량을 0.14 ~ 0.55 $\text{kgCOD}_{\text{Cr}}/\text{kgMLSS} \cdot \text{day}$ 의 범위로 운전한 결과 TSS의 제거율은 99% 이상의 높은 효율을 나타냈다. 또한 COD_{Cr} 의 제거효율은 94 ~ 97%의 범위를 나타냈다. DO농도의 변화에 따라 COD_{Cr} 제거효율은 큰 차이를 나타내지 않았으며 HRT와 MLSS농도가 증가함에 따라 COD_{Cr} 제거율이 약간 증가하였으나 그 정도는 미미하였다.
- 2) DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L로 운전한 결과 질산화율은 81 ~ 97%의 범위를 나타내었다. MLSS농도와 HRT가 증가함에 따라 질산화율이 증가하는 경향을 보였고 HRT 6시간 이상으로 유지했을 때 모든 반응조에서 94% 이상의 질산화율을 나타내었다. DO농도를 0.5 ~ 1.0 mg/L로 감소시켜 운전하였을 때 질산화율은 7 ~ 16% 감소하여 DO농도가 질산화율에 미치는 영향은 큰 것으로 나타났으며 HRT가 짧고 MLSS농도가 낮을수록 DO농도 감소에 따른 질산화율의 감소폭이 크게 나타났다.

- 3) DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L로 유지하였을 때 탈질율은 39 ~ 79%의 범위를 나타내었다. MLSS농도를 높게, HRT를 길게 유지할수록 높은 탈질율을 나타내었다. HRT증가에 따른 탈질율은 약간 높아지는 것으로 나타났으나 MLSS농도를 증가시켰을 때 최대 39% 높게 나타나 MLSS농도가 탈질율에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. DO농도를 0.5 ~ 1.0 mg/L로 운전하였을 때 탈질율은 DO농도를 1.5 ~ 2.0 mg/L로 운전하였을 때보다 7 ~ 27% 높게 나타나 DO농도는 탈질율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 HRT와 MLSS 농도가 낮을수록 DO농도의 영향이 큰 것으로 나타났다.
- 4) 총 질소제거율은 DO농도가 1.5 ~ 2.0 mg/L일 때 32 ~ 77%의 범위를 나타냈다. MLSS농도가 4,000 mg/L에서 8,000 mg/L로 증가함에 따라 질소제거율이 최대 37% 높게 나타났다. HRT가 4시간에서 8시간으로 증가함에 따라 질소제거율은 2.3 ~ 19.4% 높게 나타나 MLSS농도가 HRT보다 질소제거율에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. DO농도를 0.5 ~ 1.0 mg/L로 감소시켰을 때 HRT 4시간으로 운전한 경우 질소제거율은 약 1 ~ 9% 높게 나타났으나 HRT를 6시간 이상으로 유지한 경우 DO농도 감소에 큰 변화를 나타내지 않았다. HRT 8시간, MLSS농도 8,000 mg/L, DO농도 0.5 ~ 1.0 mg/L의 조건에서 79.0%의 가장 높은 질소제거 효율을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2009년 경희대학교 연구년 지원에 의한 결과입니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김태경(2006). 생물학적 질소인 제거 공정에서 일차 침전지의 영향에 관한 연구. 석사학위논문, 경희대학교.
2. 박종일, 이태진(2007). 단일 반응기를 이용한 동시 질산·탈질에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **29**(2), pp. 220-228.
3. 엄태규, 한동엽, 구인수(2002). 순환형 A/O시스템을 이용한 질소제거에 관한 연구. *상하수도학회지*, **16**(5), pp. 569-574.
4. 이수철, 이현용, 김동진(2000). 이중층 중공사 생물막 담체를 이용한 유동층 생물막 반응기에서의 동시 질산화와 탈질. *한국생물공학회지*, **15**(5), pp. 514-520.
5. 정용철, 이민재, 도중호, 백운학, 민경석(2005). 고정상 담체와 막분리를 이용한 하수고도처리 질소제거효율 특성. *대한상하*

- 수도학회. 한국물환경학회 2005년 공동 추계학술발표회 논문집, pp. F133-F139.
6. 한봉석(2007). 고정상 담체를 충전한 활성슬러지 공정에서 DO 농도와 HRT 및 담체 충진율 변화가 질소 제거효율에 미치는 영향. 석사학위논문, 경희대학교.
 7. APHA, AWWA, WEF(1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed. American Public Health Association, Washington, DC
 8. Ekama, G. A. and Marais, G. v. R.(1984). Biological nitrogen removal, In theory, Design and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes, *South African Water Research Commission*, Pretoria, pp. 6.1-6.26.
 9. Holakoo L., George Nakhla, Amarjeet S. Bassi and Ernest K. Yanful(2006). Long term performance of MBR for biological nitrogen removal from synthetic municipal wastewater, *Water Research*, **66**(5), pp. 849-857.
 10. How Y. Ng, Slawomir W. Hermanowicz(2003). Membrane bioreactor operation at short solids retention times: performance and biomass characteristics. *Water Research*, **39**, pp. 981-992.
 11. Levine, A. D., Tchobanoglous, G. and Asano, T.(1985). Characterization of the size distribution of contaminants in wastewater: treatment and reuse implications. *J. Water Pollut. Control Fed.*, **57**(7), pp. 805-816.
 12. Pochana, K., Keller, J.,(1999). Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification(SND). *Water Science and Technology*, **39**(6), pp. 61-68.
 13. Rodgers, M., Zhan, X. M.(2004). Biological nitrogen removal using a vertically moving biofilm system. *Bioresource Technology*, **93**, pp. 313-319.
 14. Williamson, K. and McCarty, P. L. (1976). A model of substrate utilization by bacterial films. *Water Pollution Control Federation*, **48**(1), pp. 9-24.
 15. Zhao, H. W., Mavinic, D. S., Oldham, W. K. and Koch, F. A.(1999). Controlling factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage. *Water Research*, **33**(4), pp. 961-970.