Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 24, No. 6, pp.659-669 (2008)

고정상 담체를 충전한 활성슬러지 공정에서 DO농도와 HRT 및 담체 충전율 변화가 질소 제거효율에 미치는 영향

황규대† · 한봉석

경희대학교 환경응용과학과

The Effects of DO, HRT, and Media Packing Ratio on Nitrogen Removal Efficiency in BCM-ASR System

Gye-Dae Whang† · Bong-Seok Han

Department of Environmental Engineering, Kyung Hee University

(Received 12 March 2008, Revised 9 September 2008, Accepted 14 October 2008)

Abstract

Two sets of four parallel activated sludge reactors (ASRs) maintaining an MLSS of 3000 mg/L were operated to investigate the effect of DO, HRTs and bio-contact media (BCM) packing ratios on the removal efficiency of organic matters and nitrogen. Packing ratios of BCM to BCM-ASR systems 1, 2, 3, and 4 were 0% (suspended growth only), 10%, 15% and 20%, respectively. All systems were operated at an HRT of 4 hr, 6 hr, and 8 hr, respectively; DO concentration was maintained 0.5~1.0 mg/L and 1.5~2.0 mg/L for each HRT condition. In terms of TSS, TCODcr and SCODcr removal efficiency, all systems had a similar level of the removal efficiency under varied HRTs, and DO. But organic removal efficiency of systems with BCM was approximately 3~5% higher than systems without BCM at the same HRT and the DO. About the nitrification efficiency, with high DO (1.5~2.0 mg/L), as HRT (4 hr, 6 hr, 8 hr) or BCM packing ratio increased, the slight increment of nitrification efficiency was observed. However, under the low DO (0.5~1.0 mg/L), increase of BCM packing ratio and HRT resulted in large increase of the nitrification efficiency. At the same HRT and BCM packing ratio, the nitrification efficiency increased greatly with up to 15% as DO increased. When the HRT increased from 4hr to 8hr, the denitrification efficiency slightly increased by 5~10% only, under all DO conditions. Systems with BCM had higher denitrification efficiency, ranged 62.7~91.1% than systems without BCM showed 32.1~65.6%. And the increase in BCM packing ratio from 10% to 20% resulted in about 14~16% denitrification efficiency increment. BCM packing ratio showed great effect on the denitrification. The increase of the DO (from 0.5~1.0 mg/L to 1.5~2.0 mg/L) at the same HRT and BCM packing ratio resulted in slight decrease of denitrification efficiency with up to 7% for systems with BCM. But for systems without BCM, the denitrification efficiency decreased with up to 28%. In all system, the denitrification efficiency had more influence on the TN removal efficiency than nitrification efficiency. So, BCM packing ratio (0%, 10%, 15%, 20%) has greater effect on the TN removal than HRT and DO. The TN removal efficiency increased as packing ratio of BCM increased with up to 45%. As a result, the highest TN removal efficiency was observed 73.7% at the condition showed the highest denitrification efficiency that DO of 0.5~1.0 mg/L, an HRT of 8 hr, and 20% of BCM packing ratio was maintained.

keywords : Bio-contact media (BCM), Denitrification, Nitrification, Simultaneous nitrification and denitrification (SND)

1. 서 론

하 · 폐수 처리시설의 방류수 기준이 강화되면서 질소제거를 위해 생물학적 질산화 · 탈질 반응을 활용한 효과적이고 경제적인 고도처리기술이 연구되어지고 있다. 대부분의 질소제거 공정은 질산화 반응을 위한 호기반응조와 탈질 반응을 위한 무산소 반응조를 필요로 하여 처리시설의 규모나 공정이 기존 유기물 제거 공정에 비해 크고 복잡하다. 그러나 단일 반응기내 적절한 DO농도를 유지하여 반응조의 미생물 floc내에 DO농도구배를 형성시키면 floc표면에서는 질산화 반응이 진행되고, floc내부에서는 표면에서의 질산화 과정에서 생성된 (아)질산성 질소와 전자공여체가 탈질 미생물에 의해 탈질 반응이 진행되는 동시 질산화/탈질 반응을 유도할 수 있다는 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되어졌다(Pochana and Keller, 1999; Zhao et al., 1999). 미소전극법과 FISH법, microslicing법을 이용하여 미생물 floc내부에 질산화 미생물과 탈질 미생물이 공존하고 있음을 증명한 선행 연구 결과들이 동시 질산화/탈질 반응에 의한 질소제거현상을 뒷받침하고 있다(Bishop et al., 1995; Zhang et al., 1994). 그러나 질산화 미생물은 성장속도가

† To whom correspondence should be addressed.
gdwhang@khu.ac.kr

느리며, 온도, DO농도, pH, C/N비, 중금속농도 등에 민감한 반응을 나타낸다. 또한 반응조에 부유성장 미생물만을 유지할 경우 적정 MLSS농도의 유지를 위해 폐기되는 잉여슬러지에서 질산화 미생물도 함께 폐기되기 때문에 반응조 내 질산화 미생물의 비율을 높게 유지하기가 매우 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 미생물 지지매체인 담체를 이용한 생물막 공법이 다양하게 적용되고 있다. 생물막 공법은 부유성장 공정과 달리 미생물을 지지매체에 부착시켜 오염물질을 처리하는 공정으로 반응조 내 미생물의 농도를 높게 유지시킬 수 있으며 부유성장 미생물에 비해 비교적 짧은 수리학적 체류시간에도 높은 처리효율을 나타내어 부지면적을 적게 사용할 수 있다. 또한 수리학적 부하와 유기물부하의 변동과 독성물질 유입 등의 충격부하에도 강할 뿐만 아니라 슬러지의 자산화로 인해 슬러지 발생량이 적고 유지관리가 쉽다. 담체 충전으로 미생물의 농도가 높게 유지되어 성장속도가 느린 질산화 미생물을 고농도로 운전할 수 있어 활발한 질산화 반응과 탈질 반응을 유도할 수 있는 장점이 있다. 담체가 충전되어 부착성장 미생물과 부유성장 미생물이 혼합된 반응기 내의 용존산소 농도를 조절하여 생물막 내부에 DO농도구배를 형성시켜 질산화/탈질 반응이 동시에 진행되도록 유도하여 질소제거를 위한 고도처리시설과 비슷하거나 향상된 처리효율을 얻을 수 있다면 경제적인 처리방법이라 사료된다.

따라서 본 연구는 담체를 충전한 활성슬러지 반응조에서 담체 충전 여부와 충전율, DO농도, 수리학적 체류시간이 유기물 제거효율과 질소 제거효율에 미치는 영향을 평가하고 적정 운전 조건을 도출하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1. 실험장치

본 연구를 위하여 Fig. 1과 같이 용량이 4 L인 활성슬러지 반응조와 1 L 용량의 침전지가 결합된 총 4개의 처리 시스템을 투명한 아크릴로 제작하여 운전하였다. 용존산소 농도가 낮게 유지되도록 공기공급량을 적게 하여도 반응조 내의 교반이 충분이 일어나도록 담체를 충전하지 않은 System.#1은 반응조 하부에 원형 산기관을 설치하고 상부에 임펠러를 설치하였다. 또한 담체를 충전한 System.#2와 System.#3, System.#4에는 반응조 내 담체지지 틀 하부에 원형 산기관을 설치하고 그 사이에 magnetic stirrer를 회전시켜 반응조 내에 유입수와 부유성장 미생물이 완전하게 혼합이 일어나고 담체에 미생물의 탈부착이 원활히 이루어지도록 하였다. 또한 DO농도를 일정하게 유지하기 위해 Air flowmeter를 각 시스템의 반응조 내 산기관 공기주입관에 연결하여 공기주입량을 조절하였다. 각 시스템의 유입수 주입과 침전조에서 포기조로의 외부반송을 위해 총 2대의 정량펌프를 이용하였으며, 각 반응조의 유입수 공급과 유출수를 저장하기 위해 각각 100 L와 20 L 용량의 저류조를 이용하였다.

2.2. 운전방법

활성슬러지 반응조에 담체를 충전하여 부유성장 미생물과 부착성장 미생물이 혼합된 시스템과 부유성장 미생물만이 증식된 시스템의 DO변화, 수리학적 체류시간 및 담체 충전율 변화가 유기물, 질소의 제거에 미치는 영향을 평가

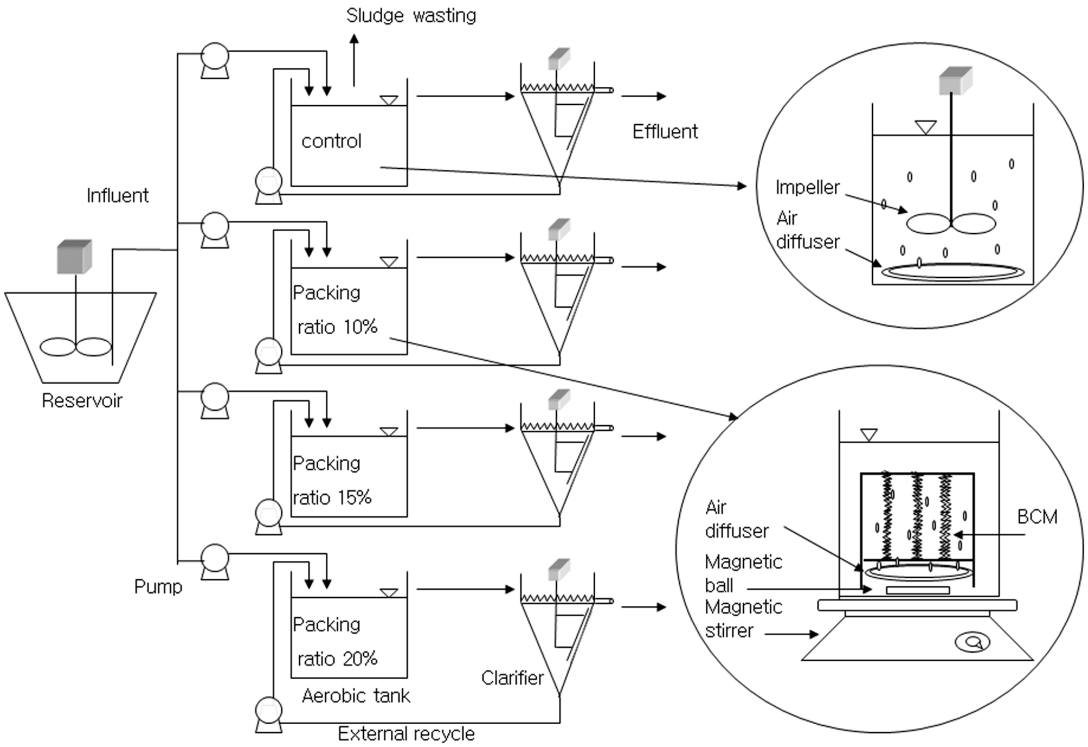


Fig. 1. Schematic diagrams of the suspended-growth and attached-growth systems.

하고 적정운전 조건을 도출하기 위해 포기조와 침전지로 구성된 총 4개의 처리 시스템을 운전하였다. System.#1은 대조군으로 부유성장 미생물만을 증식시켰으며 System.#2, #3, #4에는 반응조 용적대비 담체 충전율을 각 10%, 15%, 20%가 되도록 하였다. DO농도는 운전단계별로 나누어 조절하였고 각 운전 단계에서 반응조의 수리학적 체류시간(HRT)은 8시간과 6시간, 4시간으로 운전하였다. 1단계에는 모든 반응조의 DO농도를 1.5~2.0 mg/L로 하였고, 1단계 운전이 끝난 이후 2주간의 기간을 두고 DO농도를 서서히 낮추어 0.5~1.0 mg/L로 조절하여 2단계 운전을 실시하였다. 운전초기 포기조 내에 충전된 담체에 미생물이 충분히 부착하고 질산화율이 95%이상 유지될 때까지 DO농도를 평균 4 mg/L로 유지하며 안정화 시켰다. 이후 1주 동안 포기조 내 DO농도를 운전조건까지 서서히 감소시켰다. 반응조에 투여된 식종슬러지는 수원시 소재 S환경사업소에서 운영 중인 활성 슬러지공정의 포기조 슬러지를 각 반응조에 MLSS가 약 3000 mg/L로 유지되도록 적당량을 주입하였다. 운전기간동안 유입수의 암모니아성 질소 농도를 약 40 mg/L로 유입시키기 위해 NH_4Cl용액을 유입수에 적당량 주입하였고, 질산화되는데 소모되는 알카리를 보충하기 위해 $NaHCO_3$을 사용하였다. 모든 반응조의 pH는 7.6±0.3으로, 온도는 25±3°C로 유지하였다. 또한 침전조에서 포기조로의 외부반송은 유입유량대비 0.5 Q로 고정하여 운전하였다.

2.3. 담체 특성

본 실험에서 사용된 담체는 Fig. 2에 나타낸 BCM으로 명명된 섬유상 담체로 I사에서 개발한 polypropylene 재질의 Ringlace형이며, 현수여재의 링 고리 수는 1 m당 약 20만개의 고리가 있으며 여재 1 m당 실의 총길이는 86 km로써 미세한 실들에 360도 각도로 미생물이 부착가능하며, 단위 길이 당 비표면적은 270 m^2/m이다.

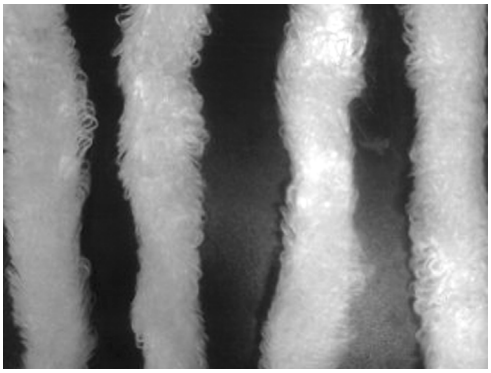


Fig. 2. Bio Contact Media (BCM).

2.4. 분석방법

유입수와 각 반응조의 유출수의 분석항목은 유기물질과 질소제거율을 평가할 수 있는 TSS/VSS, $TCOD_{cr}$, $SCOD_{cr}$, TKN, NH_4-N, NO_3-N, NO_2-N을 대상으로 하였고, 반응조 내 온도, pH 및 용존산소는 기기를 이용하였다. 반응조의 MLSS와 MLVSS의 농도는 각 포기조에서 일정량을 채취하여 분석하였다. 분석 방법은 Standard methods(APHA et al., 1995)와 수질오염공정시험법에 명시된 방법을 이용하여 실시하였다. 반응조의 DO농도가 실험계획대로 유지되는지 확인하기 위해 반응조를 담체 내 2개 지점 담체 주위 4개 지점을 선정하고 상하로 나누어 총 12지점에서 DO농도를 주기적으로 측정하였다.

2.5. 유입수 성상

본 연구에 사용된 유입수 시료는 용인시에 소재한 G환경사업소내로 유입되는 하수를 1 mm screen에 통과시켜 조대 고형물을 제거한 후 사용하였다. Table 1은 전체 운전기간동안의 유입수 성상을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지 발생량 변화

운전기간동안 각 반응조의 MLSS농도를 약 3000 mg/L로 유지하기 위해 일정량의 잉여슬러지를 포기조로부터 폐기하였다. Ringlace 형태의 여재를 호기 반응조에 충전하고 본연구와 동일한 조건으로 반응조를 운전한 결과 여재에 부착된 미생물량은 HRT가 짧을수록 충전율이 높을수록 증가하며 5200~13700 mg/L의 범위를 나타내었다는 배성현(2006)의 연구결과와 비슷한 범위의 부착미생물량이 본 연구에서 운전된 반응조 내에 존재할 것으로 사료된다. DO농도가 1.5~2.0 mg/L, HRT를 8시간으로 하였을 때 System.#1, #2, #3, #4의 평균 폐기 슬러지량은 각각 1,374 mg/day, 421 mg/day, 337 mg/day, 218 mg/day로 나타났다. 동일한 DO조건에서 HRT를 6시간으로 운전한 각 시스템에서의 평균 폐기 슬러지량은 1,625 mg/day, 642 mg/day, 560 mg/day, 341 mg/day로 나타났으며 HRT를 4시간으로 운전하였을 때 각각 2,049 mg/day, 907 mg/day, 699 mg/day, 533 mg/day으로 나타났다. DO농도를 0.5~1.0 mg/L로 감소시켜 HRT를 8시간으로 운전하였을 때 슬러지 폐기량은 각 시스템에서 1,297 mg/day, 401 mg/day, 311 mg/day, 197 mg/day로 나타났으며 HRT 6시간의 조건에서 발생하는 각 시스템에 따른 슬러지 폐기량은 1,535 mg/day, 633 mg/day, 536 mg/day, 339 mg/day로 나타났다. 또한 HRT를 4시간으로 조절한 각 시스템에서의 평균 슬러지 폐기량은

Table 1. Characteristics of domestic wastewater

Phase	Influent conc., mg/L (range)								
	pH	Alkalinity	TSS	$TCOD_{cr}$	$SCOD_{cr}$	TKN	NH_4^+-N	NO_2-N	NO_3-N
Mean	7.6	314	186	364	85	47	40	0.03	0.07
(Range)	(7.2~7.9)	(286~362)	(171~204)	(338~396)	(70~98)	(44~50)	(37~43)	(0~0.12)	(0.01~0.21)

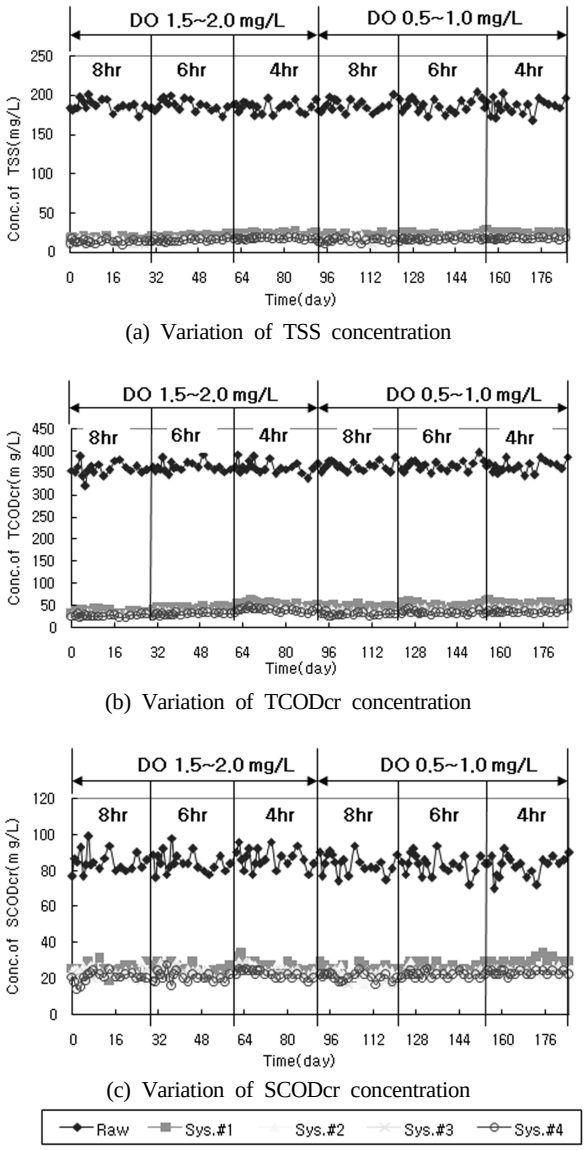
2,010 mg/day, 851 mg/day, 668 mg/day, 453 mg/day으로 나타나 담체가 충전되지 않은 시스템보다 담체가 충전된 시스템에서 평균 폐기 슬러지량이 적게 나타났으며 충전율이 증가하면서 슬러지 발생량은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 DO농도가 감소하면서 슬러지 발생량은 감소하였지만 그 감소량은 극히 미비하였다. 모든 조건의 시스템에서 기질당 슬러지 발생량을 나타내는 Y_{obs}를 산출한 결과 담체가 충전되지 않은 System.#1에서 0.318~0.397 gTSS/gCOD로 나타났으며 담체가 충전된 System.#2, #3, #4에서 0.093~0.167 gTSS/gCOD로 나타나 담체 충전으로 고농도의 미생물이 유지되면서 반응조 내 미생물량이 증가하고 자산화가 촉진되어 소비되는 기질에 따른 슬러지 발생량이 감소하는 결과를 나타낸 것으로 사료된다. 또한 HRT감소에 따라 폐기되는 슬러지량은 증가하는 것으로 나타났는데 이는 HRT 감소로 인해 유기물질의 유입부하가 증가하였기 때문으로 사료된다. 이 같은 결과는 HRT가 감소함에 따라 유기물질의 유입부하가 증가하여 폐기 슬러지량이 증가하였고, 담체 충전율이 증가함에 따라 일일 평균 폐기 슬러지량이 감소하였다는 배성현(2006)의 연구결과와 같다.

3.2. 유기물 제거 특성

담체를 충전시키지 않은 반응조와 담체를 10%, 15%, 20% 충전시킨 반응조들의 DO농도를 1.5~2.0 mg/L와 0.5~1.0 mg/L로 유지하며 각 DO농도조건에서 HRT를 8시간, 6시간, 4시간으로 변화시켜 운전한 결과 유입수와 유출수의 유기물 성상과 각 조건에서 시스템의 유기물 제거효율을 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다. DO농도가 1.5~2.0 mg/L일 때와 0.5~1.0 mg/L일 때 유입수의 TSS농도는 평균 186.3 mg/L, 186.4 mg/L이다. 동일한 HRT에서 TSS 제거율은 DO농도에 상관없이 비슷한 제거율을 나타내 DO농도 변화는 TSS 제거율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 HRT의 감소로 인해 유기물 부하량이 증가하여 TSS의 제거율이 약간 감소하는 것으로 나타났지만 HRT가 TSS제거효율에 미치는 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 담체를 충전하지 않은 System.#1의 TSS 제거율은 DO농도에 따라 88.5~90.4%, 87.1~89.6%의 범위를 나타낸 것과 비교하여 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서의 TSS 제거율은 90.0~92.7%, 89.9~91.6%로 담체를 충전하지 않은 시스템에 비해 약간 높은 TSS제거율을 나타내었다. 이는 담체를 충전한 반응조 내에 부유미생물의 floc형성과 담체표면에 생성된 생물막에 입자성 물질이 제거되었기 때문으로 사료된다. 또한 담체를 충전한 시스템은 담체를 충전하지 않은 시스템에 비해 HRT가 감소하면서 생기는 유기물 부하 증가에 따른 TSS 제거율 감소폭이 약간 작게 나타났는데 이는 담체를 충전하지 않은 시스템이 담체를 충전한 시스템보다 유기물 부하에 민감하게 반응하였기 때문으로 사료된다. 담체 충전율을 변화시킨 System.#2, #3, #4에서의 TSS 제거율을 비교한 결과 충전율이 20%인 System.#4에서

Table 2. Experimental results of organic matter removal with each system in varying condition

Phase	HRT	Sys.	TSS (mg/L)			TCODcr (mg/L)			SCODcr (mg/L)		
			Influent	Effluent	Re (%)	Influent	Effluent	Re (%)	Influent	Effluent	Re (%)
DO conc, 1.5~2.0 (mg/L)	8 hr	Sys.#1	186.6	17.9	90.4	358.7	37.3	89.6	85.1	25.3	70.2
		Sys.#2		15.1	91.9		31.6	91.2		23.4	72.5
		Sys.#3		14.0	92.5		30.1	91.6		22.3	73.8
		Sys.#4		13.6	92.7		26.9	92.5		20.2	76.3
	6 hr	Sys.#1	187.4	19.4	89.7	363.7	43.4	88.1	84.7	26.2	69.1
		Sys.#2		16.3	91.3		34.9	90.4		24.4	71.3
		Sys.#3		15.3	91.9		33.7	90.8		23.3	72.5
		Sys.#4		15.0	92.0		29.6	91.9		20.8	75.4
	4 hr	Sys.#1	184.8	21.3	88.5	363.2	50.0	85.7	86.7	27.9	67.8
		Sys.#2		18.6	90.0		43.2	88.1		26.1	69.9
		Sys.#3		17.8	90.4		41.2	88.7		24.8	71.4
		Sys.#4		16.8	90.9		38.3	89.5		22.3	74.3
DO conc, 0.5~1.0 (mg/L)	8 hr	Sys.#1	186.9	19.8	89.4	365.0	46.7	87.2	83.8	25.5	69.5
		Sys.#2		16.6	91.1		35.8	90.2		22.7	72.9
		Sys.#3		16.1	91.4		31.8	91.3		22.5	73.1
		Sys.#4		15.7	91.6		29.6	91.9		21.0	74.9
	6 hr	Sys.#1	186.6	19.5	89.6	367.2	45.8	87.5	83.6	27.2	67.5
		Sys.#2		17.3	90.7		39.6	89.2		24.2	71.3
		Sys.#3		17.2	90.8		35.2	90.4		23.7	71.7
		Sys.#4		16.1	91.4		32.9	91.0		21.9	73.8
	4 hr	Sys.#1	185.8	24.0	87.1	364.5	52.7	85.5	82.9	29.1	64.9
		Sys.#2		18.7	89.9		42.3	88.4		25.1	69.7
		Sys.#3		17.6	90.5		39.4	89.2		24.3	70.7
		Sys.#4		16.8	91.0		34.6	90.5		22.8	72.5



(a) Variation of TSS concentration

(b) Variation of TCODcr concentration

(c) Variation of SCODcr concentration

Fig. 3. Variation of organic matter concentration of influent and effluent of each system in varying condition.

높은 제거율을 보였지만 충전율 10%인 System.#2와 비교하였을 때 큰 차이를 보이지 않아 담체 충전율은 TSS 제거율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Table 2에 나타낸 것과 같이 각 조건에서 유입수의 TCODcr농도는 358.7~367.2 mg/L의 범위를 나타내었다. DO농도를 1.5~2.0 mg/L로 운전하였을 때에 비해 동일한 HRT에서 DO농도를 0.5~1.0 mg/L로 감소시켰을 때 TCODcr 제거율은 거의 변하지 않아 DO농도 변화는 TCODcr 제거율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다. HRT를 8시간에서 6시간, 4시간으로 감소시켜 운전함에 따라 유기물의 부하량이 증가하여 TCODcr 제거율은 점점 감소한 것으로 나타나 HRT가 TCODcr의 제거에 영향을 미치는 것으로 나타났으나 그 정도는 미미한 것으로 관찰되었다. 또한 DO농도를 1.5~2.0 mg/L와 0.5~1.0 mg/L로 유지하여 운전하였을 때 담체를 충전하지 않은 System.#1에서의 TCODcr 제거율은 각각 85.7~89.6%, 85.5~87.5%로 나타났으며 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서의 TCODcr 제거율은 88.1~92.5%, 88.4~91.9%로 나타나 담체를 충전하지 않은 시스템에 비해 담체를 충전한 시스템에서 약간 높은 TCODcr 제거율을 보였다. 이는 담체를 충전하여 반응조 내 미생물량이 증가하였기 때문으로 사료된다. 하지만 담체 충전율을 달리한 System.#2, #3, #4 사이의 TCODcr 제거율은 큰 차이가 보이지 않아 담체 충전율에 따른 변화는 미미한 것으로 판단된다.

DO농도를 변화시키면서 운전한 운전기간동안 유입수의 평균 SCODcr농도는 84.7~86.7 mg/L, 82.9~83.8 mg/L의 범위를 나타내었다. 동일한 HRT와 담체충전율에서 DO농도의 증가에 따른 SCODcr 제거율 증가폭은 2%미만으로 거의 변화가 나타나지 않아 DO농도는 SCODcr의 제거율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 HRT가 8시간에서 4시간으로 감소함에 따라 SCODcr 제거율은 2%정도로 미미하게 감소하였지만 큰 영향을 주지 않았다. 담체가 충전되지 않은 System.#1에서의 SCODcr 제거율은 64.9~70.2%로 나타났으며 담체가 충전된 System.#2, #3, #4에서의 SCODcr 제거율은 69.7~76.3%로 나타나 담체의 충전으로 약 3~5%의 제거율 증가를 나타내 담체 충전이 SCODcr 제거율을 약간 향상시켜 주는 것으로 나타났다. 또한 충전율이 10%에서 20%로 증가하면서 SCODcr의 제거율는 약 3%정도 증가하는 것으로 나타났다. 이는 담체가 충전되어 미생물 양이 높게 유지되었고 담체표면의 생물막 내부의 DO농도 구배에 의한 탈질반응에 탄소원으로 SCODcr이 소모되었기 때문으로 사료된다.

유기물질의 제거율은 HRT와 DO농도의 변화에 따라 큰 변화가 없었지만 담체가 충전되었을 때 약간 증가하는 것으로 나타났으며 담체 충전율에 따른 변화는 관찰되지 않았다.

본 연구의 COD부하가 1.1~2.0 kgTCOD/m^3·day인 것을 감안하면 COD 부하가 약 1.8 kgTCOD/m^3·day일 때까지 활성슬러지 공정과 담체를 충전한 공정의 유기물 제거 효율이 큰 차이가 없었다는 김선형 등(1998)의 연구와도 비슷한 경향을 보이는 것이다.

3.3. 질소 제거 특성

3.3.1. DO농도 1.5~2.0 mg/L일 때 HRT와 담체충전율에 따른 질소제거율

DO농도를 1.5~2.0 mg/L로 유지하여 운전하였을 때 유입수의 평균 TKN농도는 각 조건에서 46.7~46.9 mg/L의 범위로 나타났으며 평균 NH_4-N의 농도는 39.7~40.0 mg/L로 나타났다. 평균 TKN 부하량은 HRT 8시간, 6시간, 4시간에서 각각 0.140 kgTKN/m^3·day, 0.187 kgTKN/m^3·day, 0.281 kgTKN/m^3·day로 나타났으며 평균 NH_4-N 부하량은 각각 0.120 kgNH_4-N/m^3·day, 0.159 kgNH_4-N/m^3·day, 0.238 kgNH_4-N/m^3·day로 산출되었다. HRT가 8시간으로 운전되는 조건에서 담체가 충전되지 않은 System.#1의 유출수 평균 TKN농도는 8.6 mg/L로 나타났으며 포기조 용적대비 담체 충전율이 10%, 15%, 20%로 담체가 충전된 System.#2, #3, #4 유출수의 평균 TKN농도는 각각 7.9, 7.4, 6.1 mg/L로 나타났

다. 또한 System.#1, #2, #3, #4에서의 유출수 평균 NH_4-N 농도는 각각 6.5, 5.5, 5.4, 4.1 mg/L로 나타났다. 각 시스템에서 유출되는 유출수 NO_3-N의 평균 농도는 System.#1에서 23.8 mg/L로 나타났으며 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서 10.5, 9.2, 5.3 mg/L로 나타났다. HRT가 6시간으로 운전되는 조건에서 담체가 충전되지 않은 System.#1과 담체가 충전된 System.#2, #3, #4에서 유출되는 TKN의 평균 농도는 각각 9.2, 8.1, 8.0, 6.7 mg/L로 나타났으며 각 시스템의 유출수 평균 NH_4-N농도는 각각 7.7, 6.5, 6.3, 5.1 mg/L로 나타났다. 또한 각 시스템에서 유출되는 NO_3-N의 평균 농도는 System.#1, #2, #3, #4에서 24.0, 11.8, 9.8, 6.3 mg/L로 나타났다. HRT을 4시간으로 감소시킨 조건에서 담체가 충전되지 않은 System.#1의 유출수 평균 TKN농도는 11.3 mg/L로 나타났으며 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서 유출된 유출수의 평균 TKN농도는 각각 9.6, 8.8, 7.7 mg/L로 나타났다. 또한 각 시스템의 유출수 평균 NH_4-N농도는 각각 9.7, 8.1, 7.4, 6.3 mg/L이며 평균 NO_3-N농도는 각각 23.9, 13.1, 11.1, 7.1 mg/L로 나타났다. 각 시스템에서 제거된 암모니아성 질소의 대부분이 세포동화작용이 아닌 질산성 질소로 전환된다고 가정할 경우 질산화율과 탈질율은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Nitrification efficiency} = \frac{TKN_{inf} - NH_4\text{-}N_{eff}}{TKN_{inf}} \quad (1)$$

$$\text{Denitrification efficiency} = \frac{TKN_{inf} - (NH_4\text{-}N_{eff} + NO_3\text{-}N_{eff} + NO_2\text{-}N_{eff})}{TKN_{inf} - NH_4\text{-}N_{eff}} \quad (2)$$

위의 계산식을 이용하여 DO농도를 1.5~2.0 mg/L로 유지하는 조건에서 HRT 8시간으로 운전한 담체를 충전하지 않은 System.#1의 질산화율은 86.2%로 나타났으며 동일한 조건에서 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서의 질산화율은 각각 88.2%, 88.5%, 91.2%로 나타났다. 또한 HRT를 6시간으로 운전한 System.#1, #2, #3, #4에서의 질산화율은 각각 83.6%, 86.0%, 86.6%, 89.1%로 나타났으며 HRT를 4시간으로 유지시켰을 때 각 시스템에서의 질산화율은 79.3%, 82.8%, 84.3%, 86.7%로 나타났다. HRT가 감소함에 따라 TCOD와 TKN의 유입부하가 증가하여 질산화율이 약간 감소하였다고 사료된다. 담체가 충전되지 않은 System.#1보다 담체가 충전된 System.#2, #3, #4에서 HRT 감소에 따른 질산화율의 감소폭이 작았는데 이는 담체가 충전되지 않은 반응조보다 담체가 충전된 반응조에서 부하에 대한 변화가 강하기 때문이라 사료된다. 또한 모든 HRT에서 담체를 충전하지 않은 System.#1보다 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서 높은 질산화율이 나타났으며 담체의 충전율이 증가할수록 질산화율이 증가하였다. 이는 담체 충전으로 인해 고농도의 미생물이 유지되고, 질산화 미생물 또한 부유성장 공정보다 많은 양을 유지할 수 있었기 때문이라 사료된다 (Morper, 1994).

DO농도가 1.5~2.0 mg/L를 유지하는 조건에서 HRT를 8시간으로 운전하였을 때 탈질율을 비교한 결과 담체를 충전하지 않은 System.#1은 37.8%로 나타났으며 담체를 포기조 용적대비 10% 충전한 System.#2에서는 72.3%, 충전율 15%인 System.#3에서 75.5%, 20% 충전율의 System.#4에서 85.5%로 나타났다. 또한 HRT 6시간의 운전조건에서는 System.#1, #2, #3, #4에서 각각 35.2%, 68.1%, 73.0%, 83.0%의 탈질율을 나타냈으며 HRT를 4시간으로 변화시켜 운전한 경우 각 시스템에서 32.1%, 62.7%, 68.4%, 79.2%의 탈질율을 나타내었다. HRT가 감소함에 따라 모든 시스템에서의 탈질율은 약 4~7% 미미한 감소를 나타내었다. 탈질 반응은 생물학적 탈질과정동안 2가지 탈질단계가 동시에 일어난다고 보고되었는데, 첫번째 단계는 유입수의 Readily biodegradable COD (RBCOD)가 소모되어 탈질 반응이 일어나 높은 탈질율을 나타내며 두번째 단계는 Slowly biodegradable COD (SBCOD)가 소모되어 일어나는 탈질로 SBCOD가 가수 분해되어 생성된 RBCOD에 의해 탈질 반응이 일어나기 때문에 낮은 탈질율을 나타낸다고 보고되었다(Marais and Ekama, 1984). 따라서 반응조의 수리학적 체류시간의 감소로 인해 SBCOD의 RBCOD로의 전환이 충분히 이루어지지 못해 탈질율이 약간 낮게 나타난 것으로 사료된다. 또한 담체가 충전되지 않은 System.#1보다 담체가 충전된 System.#2, #3, #4에서 최대 53% 높은 탈질율이 나타났으며 담체 충전율이 증가하면서 탈질율이 증가하였다. 이는 담체를 충전함으로써 높은 미생물 농도를 유지할 수 있었고 생물막 내 DO농도구배로 인한 무산소 영역이 증가하여 탈질 반응이 활발하게 일어나 탈질율이 높게 나타난 것으로 사료된다.

질소제거율은 HRT 8시간일 때 담체가 충전되지 않은 System.#1에서 27.4% 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서 58.3%, 61.3%, 72.3%로 나타났다. 또한 HRT를 6시간으로 운전하였을 때 System.#1, #2, #3, #4에서의 질소제거율은 각각 26.4%, 55.3%, 59.7%, 70.7%로 나타났으며 HRT를 4시간으로 변화시켰을 때의 질소제거율은 각 시스템에서 22.2%, 48.6%, 54.6%, 65.5%로 나타났다. 질소제거율의 경향은 탈질율과 비슷한 경향을 나타내었다. 따라서 담체 충전으로 인해 T-N의 제거율은 향상되었음을 알 수 있으며 담체 충전율의 증가에 따라 제거율이 증가하는 것으로 나타났다. 부유성장 공정에서보다 담체를 충전한 공정에서 DO농도구배로 인해 미생물 floc내에 형성된 무산소 영역이 많이 존재하여 높은 탈질반응이 일어났기 때문에 질소제거율이 높게 나타났다고 사료된다. 또한 이태경 등(2002)이 세라믹 담체를 이용한 고정생물막 공정에서 담체 충전율에 따른 질소 제거율을 분석한 결과 담체 충전율이 30%에서 75%로 증가할 때 질소제거율이 25%에서 52%로 증가되었다고 보고한 것과 같이 담체 충전율이 증가하면서 고농도의 미생물이 유지될 수 있는 비표면적이 증가하고 생물막 내 존재하는 무산소 영역이 증가되었기 때문으로 사료된다. 모든 시스템에서 HRT가 감소됨에 따라 질소제거율은 미비하게 감소하는 것으로 나타났다.

3.3.2. DO농도 0.5~1.0 mg/L일 때 HRT와 담체충전율에 따른 질소제거율

DO농도를 0.5~1.0 mg/L로 운전하였을 때 유입수의 평균 TKN농도는 HRT 8시간, 6시간, 4시간일 때 각각 47.5 mg/L, 47.2 mg/L, 47.1 mg/L로 나타났으며 평균 NH_4-N농도는 각각 40.1 mg/L, 40.1 mg/L, 40.2 mg/L로 나타났다. 평균 TKN 부하량은 HRT에 따라 0.143 kgTKN/m^3·day, 0.189 kgTKN/m^3·day, 0.283 kgTKN/m^3·day로 나타났으며 평균 NH_4-N 부하량은 각각 0.120 kgNH_4-N/m^3·day, 0.160 kgNH_4-N/m^3·day, 0.241 kgNH_4-N/m^3·day로 나타났다.

HRT가 8시간으로 운전되는 조건에서 담체가 충전되지 않은 System.#1 유출수의 평균 TKN농도는 15.0 mg/L로 나타났으며 담체가 포기조 용적대비 10%, 15%, 20%로 충전된 System.#2, #3, #4에서의 유출수 평균 TKN농도는 각각 10.2 mg/L, 9.3 mg/L, 7.9 mg/L로 나타났다. 또한 HRT가 6시간일 때 System.#1, #2, #3, #4 유출수의 평균 TKN농도는 16.1 mg/L, 11.1 mg/L, 10.2 mg/L, 9.0 mg/L로 나타났으며 HRT 4시간일 때 각 시스템 유출수의 평균 TKN농도는 16.7 mg/L, 11.5 mg/L, 10.8 mg/L, 9.1 mg/L로 나타났다. HRT 8시간으로 운전될 때 System.#1, #2, #3, #4에서 유출되는 유출수의 평균 NH_4-N농도는 각각 13.7 mg/L, 9.1 mg/L, 8.5 mg/L, 7.5 mg/L로 나타났으며 HRT 6시간일 때 각 시스템에서의 유출수 평균 NH_4-N농도는 14.4 mg/L, 9.6 mg/L, 9.0 mg/L, 7.8 mg/L로 나타났다. 또한 HRT를 4시간으로 운전할 때 각 시스템에서의 유출수 평균 NH_4-N농도는 15.6 mg/L, 10.6 mg/L, 9.7 mg/L, 8.3 mg/L으로 나타났다.

HRT를 8시간으로 유지한 운전조건에서 담체를 충전하지 않은 System.#1에서의 질산화율은 71.1%로 나타났으며 System.#2, #3, #4에서의 질산화율은 각각 80.9%, 82.2%, 84.2%로 나타났다. 또한 HRT를 6시간으로 운전한 System.#1, #2, #3, #4의 질산화율은 각각 69.4%, 79.7%, 80.9%, 83.4%로 나타났으며 HRT를 4시간으로 조절하여 운전한 각 시스템에서 질산화율은 66.9%, 77.6%, 79.5%, 82.5%를 나타내었다. HRT가 감소함에 따라 질산화율이 약간 감소하였는데 이는 TCOD와 TKN의 유입부하가 증가하였기 때문으로 사료된다. 담체가 충전되지 않은 System.#1과 비교하여 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서 높은 질산화율을 나타내었고 담체 충전율이 증가함에 따라 질산화율이 증가하였다. 이는 담체 충전으로 고농도의 미생물이 유지되며 질산화 미생물 또한 부유성장 공정에 비해 많은 양이 유지될 수 있었기 때문으로 사료된다. 또한 DO농도 1.5~2.0 mg/L의 높은 조건보다 0.5~1.0 mg/L의 낮은 조건에서 담체충전율에 대한 영향이 크게 나타났는데 이는 충분치 못한 산소가 공급될 경우 담체의 비표면적이 큰 시스템에서 상대적으로 더 많은 질산화미생물을 유지시킬 수 있었기 때문이라 사료된다. DO농도를 1.5~2.0 mg/L에서 0.5~1.0 mg/L로 감소시켜 운전하였을 때 DO농도 감소에 따라 적용된 각 HRT조건에서 모든 시스템의 질산화율은 최대 15% 감소한 것으로 나타나 DO농도 감소가 질산화율에 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. DO농도가 감소함에 따라 질산화율이 낮게 나타난 것은 반응조 내 일정농도의 유기물, 낮은 용존산소농도에서 공존하는 종속영양미생물과 독립영양미생물 중 성장속도가 빠른 종속영양미생물이 우점하게 되어 성장속도가 느린 질산화 미생물의 산소 이용량을 감소시켰기 때문으로 사료된다(Pochana and Keller, 1999). 또한 미생물 floc과 생물막이 형성된 System에 낮은 DO농도를 유지하면 막 내로 용존산소의 확산에 대한 flux가 낮게 유지되어 System내 용존산소가 생물막 내로 전달이 잘 이루어지지 않아 낮은 질산화율을 나타낸 것으로 사료된다(Bernet et al., 2005).

Wang 등(2006)은 SND에 의한 질소제거를 위해 유동상 담체를 투여하고 DO농도를 1 mg/L로 유지하며 HRT가 6시간으로 운전된 공정에 COD와 NH_4-N농도가 291.5 mg/L, 28.9 mg/L인 도시하수를 주입하여 61%의 암모니아성 질소 제거율을 나타냈으며 DO농도를 2 mg/L로 조절하고 COD와 NH_4-N의 농도가 311.8 mg/L, 23.5 mg/L인 도시하수를 주입하였을 때 94.3%의 암모니아성 질소제거율을 나타냈다고 보고하였는데 이는 본 연구결과와 마찬가지로 DO농도의 증가로 인해 암모니아성 질소 제거율이 약 33%로 크게 증가한 것이다. Sen and Dentel(1998)은 DO농도가 2.5 mg/L로 유지된 FBR (Fludized Bed Reactor)공정에서 COD, T-N 유입부하가 3.0 kgCOD/m^3·day, 0.25 kgN/m^3·day가 되도록 합성폐수를 주입하여 90%의 질산화율을 얻었다고 보고하였다. 본 연구에서 적용된 DO농도 범위에서 나타나는 질산화율은 66.9~91.2%로 타 논문의 연구결과와 대체로 비슷한 결과를 나타내었다. 박희등 등(2003)은 부유성 플라스틱 담체를 이용한 MLE공정에서의 하수처리에 대한 성능평가에서 HRT 8시간, 호기조 DO농도를 2.1~2.3 mg/L로 유지하고 TCODcr 257 mg/L, TKN 37.5 mg/L의 유입수를 주입한 결과, 담체를 충전한 공정에서 담체를 충전하지 않은 공정보다 약 4% 높은 98.1%의 암모니아성 질소 제거율을 얻을 수 있었다고 보고하였다. Rodgers and Zhan(2004)은 HRT 8시간인 무산소-호기 공정에서 TCOD, TKN 유입부하가 1.46 kgTCOD/m^3·day, 0.23 kgTKN/m^3·day이 되도록 유입수를 주입하여 약 95%의 질산화율을 나타내었다고 보고하였다. 또한 류홍덕과 이상일(2005)은 HRT가 8시간으로 운전되는 무산소-호기로 이루어진 M-Dephanox공정에 TCODcr, TKN농도가 각각 217 mg/L, 42 mg/L인 도시하수를 주입하여 94%의 암모니아성 질소 제거율을 나타내었다고 보고하였다. 따라서 무산소-호기 조건으로 분리된 공정이 본 연구와 같이 SND를 이용한 공정보다 대체적으로 높은 암모니아성 질소 제거량을 나타내는 것으로 조사되었다.

HRT를 8시간으로 운전한 System.#1에서의 탈질율은 65.6%로 나타났으며 담체를 충전한 System.#2, #3, #4에서의 탈질율은 77.5%, 84.2%, 91.1%로 나타났다. 또한 HRT를 6시간으로 유지한 각 시스템에서의 탈질율은 각각 60.0%, 74.6%, 82.4%, 89.7%로 나타났으며 HRT가 4시간인 각 시스템에서 탈질율은 53.8%, 69.4%, 75.5%, 85.5%로 나타났다. 모든 DO농도 조건에서 HRT감소는 약 5~10%의 탈질

율 감소를 나타내 HRT는 탈질율에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. DO농도가 감소함에 따라 탈질율은 증가하였는데 이는 낮은 DO농도 하에 종속영양미생물인 탈질미생물이 독립영양미생물인 질산화 미생물보다 우점하여 DO농도가 1.5~2.0 mg/L인 조건에서 보다 0.5~1.0 mg/L인 조건에서 높은 탈질율이 나타났다고 사료된다. 또한 DO농도가 낮게 유지된 조건에서 미생물 floc과 담체 충전으로 인한 생물막 생성에 용존산소가 제한인자로 작용하여 생물막 내 무산소 영역이 증가되어 각 반응조의 탈질율이 높게 나타났기 때문이라 사료된다(Third et al., 2003). DO농도가 감소하면서 담체가 충전되지 않은 System에서는 최대 28%의 탈질율 증가를 나타내었고 담체를 충전한 System에서는 약 5~10%의 증가를 나타내 담체를 충전한 System이 조건 변화에 대한 대응력이 강하여 일정한 처리효율을 낼 수 있다고 사료된다. 모든 DO농도에서 담체를 충전한 System은 충전하지 않은 System에 비해 많은 양의 미생물을 유지할 수 있기 때문에 약 15~40% 높은 탈질율을 나타내었고 담체 충전율이 10%에서 20%로 증가할 때 탈질율은 약 14~16% 증가하였다. 대부분의 System에서 질산화율에 대한 탈질율이 약 90%미만으로 나타났는데, 이는 분해가 쉬운 RBCOD는 미생물 플록이나 생물막 표면에서 빠르게 사용되고 플록 내부나 생물막 내부로 공급된 유기물은 대부분 SBCOD로 탈질반응에 필요한 탄소원으로 원활히 사용되지 못해 탈질 반응속도를 느리게 하여 전체적인 탈질율이 낮게 나타난 것으로 사료된다.

DO농도가 0.5~1.0 mg/L로 유지되는 조건에 HRT를 8시간으로 운전한 결과 담체가 충전되지 않은 System.#1에서 질소제거율은 41.7%로 나타났으며 담체를 10% 충전한 System.#2에서는 58.4%, 담체를 15% 충전한 System.#3에서는 65.6%, 담체를 20% 충전한 System.#4에서는 73.7%로 나타났다. 또한 HRT를 6시간으로 운전했을 때 System.#1, #2, #3, #4의 질소제거율은 38.1%, 56.2%, 64.2%, 72.4%로 나타났으며 HRT를 4시간으로 운전한 경우 각 시스템에서 질소제거율은 33.9%, 52.0%, 57.8%, 68.2%로 나타났다. 질소제거율의 경향은 탈질율과 비슷하게 나타났다. 따라서 DO농도가 1.5~2.0 mg/L에서 0.5~1.0 mg/L로 감소함에 따라 적용된 각 HRT조건에서 질산화율이 약간 감소하였지만 모든 시스템의 탈질율이 증가하여 질소제거율을 증가시켰으며 HRT가 감소함에 따라 질소제거율이 약간 감소하는 것으로 나타났다. HRT 감소로 인해 유입부하가 증가하여 질산화율이 감소하게 됨과 동시에 체류시간이 충분치 못해 탈질율 역시 감소하게 되어 질소제거율이 감소하게 되는 것이라 사료된다. 담체를 충전함으로써 고농도의 미생물양을 유지한 시스템이 담체를 충전하지 않은 시스템에 비해 최대 32% 높은 질소제거율을 나타냈으며 충전율이 증가하면서 질소제거율이 증가되었다. HRT가 감소하면서, DO농도가 높을수록 담체충전에 의한 영향은 크게 나타났다.

Wang 등(2006)은 SND를 이용한 유동상 담체가 충전된 활성슬러지 반응조를 HRT 6시간, DO농도를 1 mg/L로 유지하여 COD와 T-N 유입부하를 1.17 kgCOD/m^3·day, 0.14 kgNH_4-N/m^3·day가 되도록 도시하수를 주입하여 54.3%의 질소제거율을 얻었으며 동일 조건에서 DO농도를 2 mg/L로 상승시켜 운전한 경우 89.9%의 질소제거율을 얻어 본 연구에서 얻은 연구결과와 비교하여 높은 질소제거율을 나타내었다. 이는 본 연구에서 사용한 유입수가 일차침전지를 거치지 않아 입자상 유기물농도가 높아져 유기물 부하가 높게 유지되었기 때문으로 사료된다. 이수철 등(2000)은 이중층 중공사 생물막 담체를 충전한 SND반응조를 DO농도 1~2 mg/L로 유지하며 COD와 NH_4-N부하가 2.1 kgCOD/m^3·day, 2.1 kgNH_4-N/m^3·day인 합성폐수를 주입하여 84%의 질산화율과 67%의 질소제거율을 나타내 본 연구 중 담체 충전율이 20%인 System.#4를 HRT 4시간으로 운전하여 얻은 결과와 비슷한 결과를 나타냈다. 또한 박종일과 이태진(2007)은 SND를 이용한 단일 반응조에서 COD농도 200 mg/L, TN농도 28 mg/L인 합성폐수를 DO농도 0.5 mg/L, HRT 24시간의 조건으로 운전했을 때 60%의 질소제거율을 나타내었다고 보고하였다. 이는 충전율이 15%인 System.#3을 HRT 6시간으로 운전한 결과와 비슷하게 나타난 것이다. Third 등(2005)는 동시 질산화/탈질 반응을 유도하기 위해 SBR공정에서 HRT 6.7 시간, DO농도를 1 mg/L로 유지하여 운전한 결과 TCOD와 TKN 유입부하가 1.94 kgTCOD/m^3·day, 0.216 kgTKN/m^3·day로 되도록 주입하여 65%의 T-N제거율을 얻었다고 보고하여 본 연구에서 담체를 충전하지 않고 운전한 System.#1보다 높은 제거율을 나타내었다.

이해일 등(2003)은 mat형 담체가 충전된 MLE공정에서 COD, NH_4-N 유입부하가 각각 3.0 kgCOD/m^3·day, 0.5~0.8 kgNH_4-N/m^3·day가 되도록 합성폐수를 주입하여 96%의 암모니아성 질소 제거율과 90%의 질소제거율을 얻을 수 있었다고 보고하였다. 또한 원종철 등(2000)은 MLE공정에 고농도 NH_4-N함유 침출수를 주입시켜 TCOD와 TN 유입부하가 각각 0.3 kgCOD/m^3·day, 0.1 kgTKN/m^3·day인 침출수를 유지하여 운전한 결과 88%의 질소제거율을 나타냈다고 보고하였다. Rodgers and Zhan(2004)은 HRT 8시간의 무산소-호기공정에 TCOD, TKN 유입부하가 1.46 kgTCOD/m^3·day, 0.23 kgTKN/m^3·day가 유지되도록 유입수를 주입하여 최대 82%의 질소제거율을 나타냈다고 보고하였다. SND공정의 질소제거효율은 DO농도, 담체 특성, 충전율 등 운전조건에 따라 MLE공정보다 비슷하거나 높게 나타날 경우도 있지만 대체적으로 70%이하로 MLE공정보다 비교적 낮게 나타났다. MLE공정은 탈질반응이 일어나는 반응조와 질산화 반응이 일어나는 반응조가 분리되어 있어 각 반응조의 역할을 적절한 조건에 맞춰 운전할 수 있는 반면, SND공정은 동일한 조건에서 유기물, 용존산소, 암모니아성 질소가 혼합되어 탈질 반응과 질산화 반응이 동시에 일어나도록 운전된다. SND공정에서는 미생물 floc이나 생물막 내부로 유기물과 암모니아성 질소, 용존산소가 동시에 확산, 공급되어야 한다. Williamson and McCarty(1976)는 1 mg의 NH_4-N가 산화하기 위해서는 4.5 mg의 산소가 필요하고 NH_4-N과 산소의 확산계수는 각각 1.5 cm^2/d, 2.2

Table 3. Experimental results of nitrification and denitrification, T-N removal with each system in varying condition

Phase	HRT	Sys.	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)	8 hr	Sys.#1	46.7	8.6	40.0	6.5	0.086	23.8	86.2	37.8	27.4
		Sys.#2		7.9		5.5		10.5	88.2	72.3	58.3
		Sys.#3		7.4		5.4		9.2	88.5	75.5	61.3
		Sys.#4		6.1		4.1		5.3	91.2	85.5	72.3
	6 hr	Sys.#1	46.7	9.2	39.8	7.7	0.089	24.0	83.6	35.2	26.4
		Sys.#2		8.1		6.5		11.8	86.0	68.1	55.3
		Sys.#3		8.0		6.3		9.8	86.6	73.0	59.7
		Sys.#4		6.7		5.1		6.3	89.1	83.0	70.7
	4 hr	Sys.#1	46.9	11.3	39.7	9.7	0.035	23.89	79.3	32.1	22.2
		Sys.#2		9.6		8.1		13.06	82.8	62.7	48.6
		Sys.#3		8.8		7.4		11.13	84.3	68.4	54.6
		Sys.#4		7.7		6.3		7.12	86.7	79.2	65.5
DO conc, 0.5~1.0 (mg/L)	8 hr	Sys.#1	47.5	15.0	40.1	13.7	0.057	10.62	71.1	65.6	41.7
		Sys.#2		10.2		9.1		7.80	80.9	77.5	58.4
		Sys.#3		9.3		8.5		5.27	82.2	84.2	65.6
		Sys.#4		7.9		7.5		2.81	84.2	91.1	73.7
	6 hr	Sys.#1	47.2	16.1	40.1	14.4	0.057	12.08	69.4	60.0	38.1
		Sys.#2		11.1		9.6		8.71	79.7	74.6	56.2
		Sys.#3		10.2		9.0		5.90	80.9	82.4	64.2
		Sys.#4		9.0		7.8		3.26	83.4	89.7	72.4
	4 hr	Sys.#1	47.1	16.7	40.2	15.6	0.097	13.2	66.9	53.8	33.9
		Sys.#2		11.5		10.6		10.3	77.6	69.4	52.0
		Sys.#3		10.8		9.7		8.5	79.5	75.5	57.8
		Sys.#4		9.4		8.3		5.1	82.5	85.5	68.2

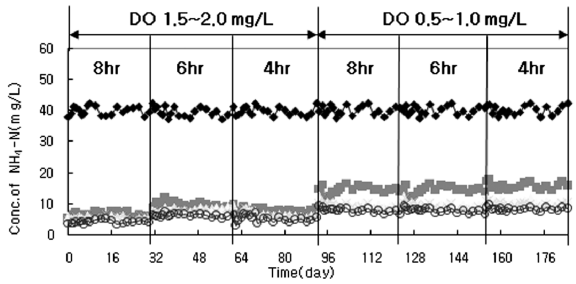
cm^2/d이므로 화학반응식의 몰비와 확산계수에 따라 1 mg/L의 NH_4-N가 산화하기 위해서는 반응조 내 산소농도가 NH_4-N 농도의 약 2.7배로 유지되어야 한다고 보고하였다. 또한 Levine 등(1985)은 입자크기가 작으면 작을수록 확산계수가 크고 미생물에 의해 분해도 빨리 일어날 것이라고 보고하였다.

SND가 일어나기 위해서는 미생물 플록이나 생물막 내부로 유기물이나 산소, 암모니아성 질소 등이 화학양론식의 몰 비에 맞게 확산되어 공급되어야 한다. 암모니아성 질소가 산화하기 위해 요구되는 산소공급량은 유기물에 비해 크므로 입자 크기가 작아 확산계수가 큰 생분해성이 높은 유기물은 먼저 산소와 반응하여 산화될 것이다. 이후 암모니아성 질소는 유기물산화에 사용되고 남은 잔류산소와 반응하여 질산성 질소로 전환될 것이다. 질산화 반응으로 발생된 NO_3-N는 유기물과 반응하여 탈질 반응을 일으켜 질소가스로 전환되는데 입자의 크기가 작고 확산계수가 큰 유기물은 이미 생물막 표면에서 산화가 되었기 때문에 입자크기가 크고 확산계수가 작아 확산속도가 느린 유기물이 탈질반응에 사용되어질 것으로 예상할 수 있다. NO_3-N이 환원되는데 필요한 탄소원으로 입자크기가 크고 확산계수가 낮아 확산이 느린 유기물이 공급되어 질소제거율이 낮게 나타날 것이라고 예상할 수 있다. 반면 무산소조와 호기조가 나눠져 있는 MLE공정은 유입수가 바로 무산소조로 유입되기 때문에 입자 크기가 작고 생분해성이 높은 유기물이 탈질반응에 필요한 유기물로 공급되고 호기조의 충분한 산소공급량으로 질산화 반응이 활발하여 본 연구결과보다 높은 질소제거율을 나타낸 것으로 사료된다. 하지만 MLE공정은 호기조에서 무산소조로 내부반송하는 과정에서 용존산소가 함께 유입되어 탈질효율을 감소시키고, 질소제거율을 증가시키기 위해 내부반송율을 증가시키면 호기조의 수리학적 체류시간이 감소되어 원하는 질산화율을 얻기 어려운 문제점이 있다.

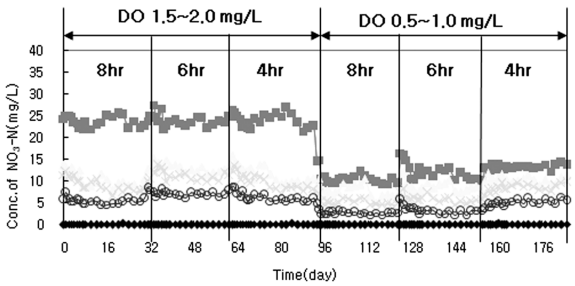
본 연구결과 담체충전율이 20%인 반응조에 HRT를 8시간, DO농도를 0.5~1.0 mg/L 범위로 운전하였을 때 73.7%의 질소제거율을 나타내어 가장 높은 질소제거효율을 나타내었다. Table 3은 DO농도와 HRT 및 담체 충전율에 따른 TKN, NH_4-N, NO_3-N 및 질산화율, 탈질율, 질소제거율을 나타낸 것이다. 또한 각 조건에 따른 TKN, NH_4-N, NO3-N의 농도변화를 Fig. 4에 나타내었으며 각 조건에서의 질산화율, 탈질율, 질소제거율을 Fig. 5에 나타내었다.

4. 결 론

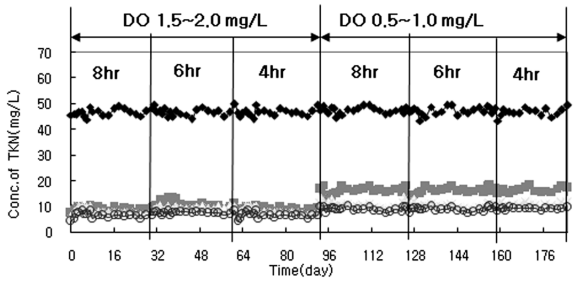
DO농도(0.5~1.0 mg/L, 1.5~2.0 mg/L)와 수리학적 체류시간(4시간, 6시간, 8시간) 및 담체 충전율(0%, 10%, 15%, 20%) 변화가 고정상 담체를 충전하여 부유성장 미생물과 부착성장 미생물이 혼합 증식된 시스템과 부유성장 미생물만이 증식된 시스템의 처리효율에 미치는 영향을 분석하기



(a) Variation of NH_4-N concentration



(b) Variation of NO_3-N concentration



(c) Variation of TKN concentration

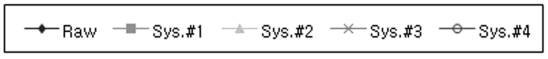
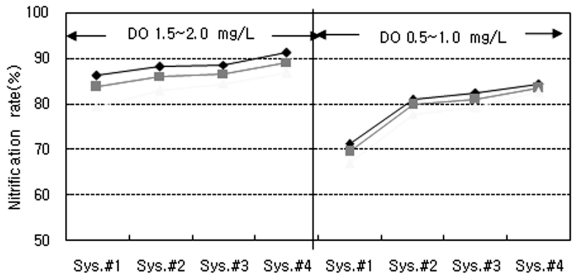
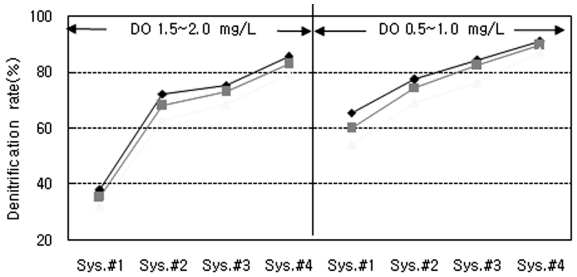


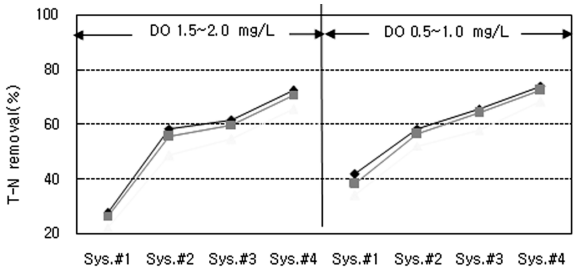
Fig. 4. Variation of NH_4-N, NO_3-N, TKN concentration of influent and effluent of each system in varying condition.



(a) Variation of Nitrification rate



(b) Variation of Ditrification rate



(c) Variation of T-N removal rate

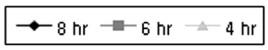


Fig. 5. Variation of Nitrification rate, Denitrification rate and T-N removal of each system in varying condition.

위해 처리시스템을 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) TCOD농도가 평균 363.7 mg/L인 유입수를 주입하여 HRT변화에 따라 TCOD부하를 1.1~2.0 kgTCOD/m^3·day로 운전한 담체가 충전되어 있는 시스템의 유기물 제거율은 DO농도, 담체충전율 변화에 관계없이 TSS, TCODcr, SCODcr제거율은 각각 91.2%, 90.4%, 72.7%로 나타났다. 담체를 충전하지 않은 시스템은 이보다 약 3~5% 낮은 제거율을 나타내었다.
2) DO농도가 1.5~2.0 mg/L로 유지된 담체가 충전된 시스템에 TKN농도가 47 mg/L인 유입수를 주입한 결과 유출수 암모니아 농도는 4.1~8.1 mg/L로 82.8~91.2%의 질산화율을 나타내었다. HRT와 담체충전율의 변화로 질산화율은 약 8%의 변화를 나타내었다. 또한 DO농도가 0.5~1.0 mg/L로 감소하면서 질산화율은 5~8% 감소하여 큰 영향을 나타내지 않았다. 담체가 충전되지 않은 시스템은 담체가 충전된 시스템에 비해 질산화율이 낮게 나타났으며 담체가 20% 충전된 시스템보다 13~15% 낮게 나타났다. DO농도를 낮게 유지한 경우 담체충전과 충전율에 의한 영향이 DO농도를 높게 유지한 경우보다 크게 나타났다. HRT 8시간, 담체 충전율 20%, DO농도 1.5~2.0 mg/L로 운전된 조건에서 91.2%로 가장 높은 질산화율을 나타내었다.
3) 담체가 충전되어있는 시스템에 DO농도를 0.5~1.0 mg/L로 운전한 결과 HRT 8시간, 담체충전율 20%인 반응조에서 가장 높은 탈질율을 나타내었으며 HRT와 담체충전율 변화에 따라 유출수의 NO_3-N농도는 2.8~10.3 mg/L로 69.4~91.1%의 탈질율을 나타내었다. HRT에 따라 약 6~10%의 탈질율 감소하는 것으로 나타났으며 담체충전율을 10%로 충전한 시스템보다 20%로 충전한 것에서 탈질율이 약 14~16% 높게 나타났다. 담체가 충전되지 않은 시스템에서는 담체를 충전한 시스템에 비해 탈질율이 약 15~40% 낮게 나타나 탈질율은 담체충전과 충전율 변화에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. DO농도를 1.5~2.0 mg/L로 증가시킨 경우 담체가 충전

된 시스템은 탈질율이 약 5~9%의 감소하는 것으로 나타났지만 담체가 충전되지 않은 시스템의 경우 최대 28% 감소되었다.

4) 모든 시스템에서 질소제거율은 탈질율과 비슷한 경향을 나타내 질소제거율은 탈질율에 따라 결정되는 것으로 나타났다. DO농도가 낮은 조건에서 담체가 충전된 시스템의 질소제거율은 52.0~73.7%를 나타내었다. HRT감소에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내었으며 담체충전율이 10%인 시스템보다 20%인 시스템에서 질소제거율이 약 16% 높게 나타났다. 담체가 충전되지 않은 시스템에서는 이보다 약 10~50% 낮은 질소제거율을 보여 탈질율과 마찬가지로 질소제거율 역시 담체 충전과 충전율에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. DO농도를 증가시킨 경우 질소제거율은 약 4~14% 감소하여 담체에 비해 DO농도의 변화는 그리 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며 담체충전과 충전율 변화에 대한 변화폭이 낮은 DO농도에서 보다 더 크게 나타났다.

참고문헌

김선형, 박희등, 임성균, 최광호(1998). 폴리우레탄 담체를 이용한 합성 폐수 및 피혁 폐수의 생물학적 처리. *수질보전 한국물환경학회지*, **14**(3), pp. 251-258.

류홍덕, 이상일(2005). 부유 및 부착성장 미생물을 이용하는 공정의 유기물, 질소 및 인 제거 특성 비교. *대한환경공학회지*, **27**(2), pp. 206-214.

박종일, 이태진(2007). 단일 반응기를 이용한 동시 질산·탈질에 관한 연구. *대한환경공학회지*, **29**(2), pp. 220-228.

박희등, 임봉수, 김현용(2003). 부유성 플라스틱 담체를 이용한 MLE공정의 하수고도처리 성능평가. *대한토목학회 논문집*, **23**(5B), pp. 463-470.

배성현(2006). 고정생물막을 이용한 A_2O공정에서 무산소조 체류시간 변화가 유기물질 질소 및 인 제거에 미치는 영향. 석사학위논문, 경희대학교.

원종철, 남궁완, 배영신, 이경신, 박기혁, 송수성, 윤조희(2000). MLE공정을 이용한 고농도 NH_4^+-N함유 침출수의 생물학적 질산화/탈질. *대한환경공학회지*, **22**(6), pp. 1027-1035.

이수철, 이현용, 김동진(2000). 이중층 중공사 생물막 담체를 이용한 유동층 생물막 반응기에서의 동시 질산화와 탈질. *한국생물공학회지*, **15**(5), pp. 514-520.

이태경, 박재구, 한기봉(2002). 세라믹 담체를 이용한 고정생물막 공정에서의 동시 질산화 및 탈질화. *대한환경공학회지*, **24**(6), pp. 1105-1115.

이해일, 임정훈, 고주형, 김창원(2003). 생물막 반응기를 이용한 고농도 유기성 폐수의 질산화와 탈질. *대한환경공학회지*, **25**(4), pp. 517-522.

APHA, AWWA, WEF (1995). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Bernet, N., Sanchez, O., Cesbron, D., Steyer, J. P., and Delgen., J. P. (2005). Modeling and control of nitrite accumulation in a nitrifying biofilm reactor. *Biochemical Engineering Journal*, **24**, pp. 173-183.

Bishop, P. L., Zhang, T. C., and Fu, Y. C. (1995). Effects of biofilm structure, microbial distributions and mass transport on biodegradation processes. *Wat. Sci. Tech.*, **31**(1), pp. 143-152.

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.

Marais, G. v. R. and Ekama, G. A. (1984). Biological nitrogen removal. In theory, Desigen and Operation of Nutrient Removal Activated Sludge Processes, 6.1~6.26, South African Water Research Commission, Pretoria.

Morper, M. R. (1994). Upgrading of activated sludge systems for nitrogen removal by application of the LINPOR-CN process. *Wat. Sci. Tech.*, **29**(12), pp. 167-176.

Pochana, K. and Keller, J. (1999). Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND). *Water Sci. Technol.*, **39**(6), pp. 61-68.

Rodgers, M. and Zhan, X. M. (2004). Biological nitrogen removal using a vertically moving biofilm system. *Bioresource Technology*, **93**, pp. 313-319.

Sen, P. and Dentel, S. K. (1998). Simultaneous nitrification-denitrification in fluidized bed reactor. *Wat. Sci. Tech.*, **38**(1), pp. 247-254.

Third, K. A., Burnett, N., and Ralf, C. R. (2003). Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electron donor in an SBR. *Biotech. and Bioengin.*, **83**(6), pp. 706-720.

Third, K. A., Gibbs, B., Newland, M., and Cord-Ruwisch, R. (2005). Long-term aeration management for improved N-removal via SND in a sequencng batch reactor. *Water Research*, **39**, pp. 3523-3530.

Wang, X. J., Xia, S. Q., Chen, L., Zhao, J. F., Renault, N. J., and Chovelon, J. M. (2006). Nutrients removal from municipal wastewater by chemical precipitation in a moving bed biofilm reactor. *Process Biochemistry*, **41**, pp. 824-828.

Williamson, K. and McCarty, P. L. (1976). A model of substrate utilization by bacterial films. *Journal WPCF.*, **48**(1), pp. 9-24.

Zhang, T. C., Fu, Y. C., and Bishop, P. L. (1994). Competition in biofilms. *Wat. Sci. Tech.*, **29**(10-11), pp. 263-270.

Zhao, H. W., Mavinic, D. S., Oldham, W. K., and Koch, F. A. (1999). Controllong factors for simultaneous nitrification and denitrification in a two-stage intermittent aeration process treating domestic sewage. *Water Res.*, **33**(4), pp. 961-970.