

## 교차 간헐 포기식 부직포 여과막 생물반응조에서 MLSS 농도 및 유입수 C/N 비가 질소 제거효율에 미치는 영향

정경은 · 배민수 · 이종호 · 조윤경\* · 조광명<sup>†</sup>

인하대학교 환경토목공학부 · \*위스콘신대학교 토목환경공학부

(2006년 3월 23일 접수, 2006년 4월 26일 채택)

### Effects of MLSS Concentration and Influent C/N Ratio on the Nitrogen Removal Efficiency of Alternately Intermittently Aerated Nonwoven Fabric Filter Bioreactors

Kyoung-Eun Jung · Min-Su Bae · Jong-Ho Lee · Yun-Kyung Cho\* · Kwang-Myeung Cho<sup>†</sup>

School of Environmental & Civil Engineering, Inha University

\*Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison

**ABSTRACT :** To investigate the effects of MLSS concentration and influent C/N ratio on the nitrogen removal efficiency of alternately intermittently aerated nonwoven fabric filter bioreactors, the MLSS concentrations of the reactors were maintained at approximately 5,500 mg/L, 10,000 mg/L and 15,000 mg/L, and the influent TCOD/TKN ratio was decreased gradually from 5 to 2 by adding NH<sub>4</sub>Cl. The influent was prepared by diluting a food waste leachate to a TCOD concentration of about 300 mg/L. The results of the experiment showed F/M ratios less than 0.112 g TCOD/g MLSS-day, average TCOD removal efficiencies of above 95%, and an average observed microbial yield coefficient of 0.283 g MLSS/g COD removed. The nitrification efficiencies were computed to be always better than 96% except one case where the nitrification efficiency was 90.5% when the MLSS concentration and the influent TCOD/TKN ratio was 5,500 mg/L and 2, respectively. The denitrification efficiency deteriorated as the influent TCOD/TKN ratio decreased. The average denitrification efficiency at the MLSS concentration of 10,000 mg/L was 10.7% better than that at the MLSS concentration of 5,500 mg/L, and the denitrification rate improved at a rate of 2.66 mg N/L as the MLSS concentration increased by 1,000 mg/L. When the MLSS concentration was 15,000 mg/L, however, the average denitrification efficiency was merely 4.6% higher compared to when the MLSS concentration was 5,500 mg/L, and the denitrification rate increased at a rate of 0.75 mg N/L per 1,000 mg/L MLSS increase. Therefore, no strict proportional relationship was found between MLSS concentration and endogenous denitrification rate. The average alkalinity consumption rate was 3.36 mg alkalinity/mg T-N removed, which is similar to the theoretical value of 3.57 mg alkalinity/mg T-N removed, but the rate increased as the influent TCOD/TKN ratio decreased.

**Key Words :** Nitrogen Removal, Nitrification, Endogenous Denitrification, MLSS Concentration, C/N Ratio, Nonwoven Fabric, Alkalinity

**요약 :** 교대로 간헐적으로 포기되는 2개의 부직포 여과막 생물반응조로 폐수를 처리할 때 반응조의 MLSS 농도와 유입수의 C/N 비가 질소 제거효율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 MLSS 농도를 약 5,500 mg/L, 10,000 mg/L 및 15,000 mg/L로 유지하면서 NH<sub>4</sub>Cl을 첨가하여 유입수의 TCOD/TKN 비를 5, 4, 3 및 2로 감소시켰다. 유입수는 음식물 쓰레기 침출수를 COD농도가 약 300 mg/L되도록 희석시킨 것이었다. 실험 결과, 반응조의 F/M 비는 0.112 g COD/g MLSS-day 이하, COD 제거효율은 95% 이상, 그리고 미생물 성장계수 (Y<sub>obs</sub>) 값은 평균 0.283 g MLSS/g COD로 나타났다. 질산화 효율은 MLSS 농도가 5,500 mg/L이고 유입수의 TCOD/TKN 비가 2인 경우의 90.5%를 제외하고 모두 96% 이상이었다. 탈질효율은 유입수의 TCOD/TKN 비가 감소할수록 악화되었다. MLSS 농도가 5,500 mg/L인 경우에 비하여 10,000 mg/L인 경우에 탈질효율이 평균 10.7% 더 높아, MLSS 농도가 1,000 mg/L 증가함에 따라 평균 2.66 mg N/L의 율로 탈질율이 증가하였다. 그러나, MLSS 농도가 15,000 mg/L로 유지된 경우에는 5,500 mg/L인 경우에 비하여 탈질효율이 평균 4.6%만 더 높아 MLSS 농도가 1,000 mg/L 증가함에 따라 평균 0.75 mg N/L의 율로 탈질율이 증가하였다. 따라서 MLSS 농도와 내생 탈질을 간에 비례관계가 성립되지 않았다. 알칼리도 소모량은 유입수의 TCOD/TKN 비가 5인 경우에 제거된 T-N 1 mg 당 평균 3.36 mg으로서 이론값인 3.57 mg에 가까웠으나 유입수의 TCOD/TKN 비가 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

**주제어 :** 질소 제거, 질산화, 내생 탈질, MLSS 농도, C/N 비, 부직포, 알칼리도

## 1. 서론

폐수 중의 질소화합물을 제거하기 위한 방법으로는 파괴법

염소주입, 암모니아 탈기, 이온교환 등의 물리화학적 방법과 질산화-탈질공정에 의한 생물학적 방법이 있다.<sup>1)</sup>

생물학적 질소 제거 공법들은 물리화학적 공법보다 경제적이고 환경친화적이라는 장점이 있는 반면, 탈질 시 요구되는 유기물의 양이 충분하지 않을 경우 탄소원을 보충해야 하는 단점이 있는데, 탄소원을 보충하는 방법에는 적당한 유기물

<sup>†</sup> Corresponding author

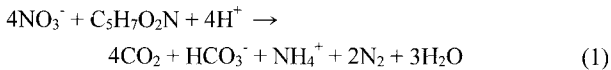
E-mail: kmcho@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7502

Fax: 032-867-0864

을 공급하는 방법과 반응조 내의 미생물의 내생호흡 시 생성되는 유기물을 이용하는 방법이 있다. 외부 탄소원으로는 메탄올이 주로 사용되는데, 비용이 많이 들고 처리수 내에 유기물이 잔존할 가능성이 높기 때문에 운전상 어려움이 있다.<sup>1)</sup> 그러나 반응조 내에 미생물을 고농도로 유지할 수 있으면 미생물의 자산화 시 생성되는 유기물을 탄소원으로 이용할 수 있으므로 이러한 문제점들을 어느 정도 완화시킬 수 있을 것으로 추정된다.

미생물의 자산화에 의한 탈질반응은 식 (1)로 표현될 수 있는데, 이 경우 제거되는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 1 g 당 2.02 g의 미생물체 (biomass)가 산화되고 동시에 0.25 g의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N가 생성되므로 용해성 질소의 순 제거율은 75%가 되며<sup>2,3)</sup> 반응조 체류시간이 길어야 하고<sup>2)</sup> 탈질효율이 낮다는 단점이 있다.<sup>4)</sup>



최근에 개발된 막 결합형 생물반응조(membrane bioreactor; MBR)에서는 생물학적 처리 외에 막에 의한 고액분리가 가능하여 처리효율이 높고 안정된 수질의 처리수를 얻을 수 있으며, 슬러지 침전과 반송이 불필요하므로 전체공정을 단순화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 반응조 내에 질산화미생물과 같이 성장속도가 느린 미생물도 고농도로 유지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 사용되는 막이 비싸고 막의 저항성이 높아 적당량의 투과수량을 얻기 위해서는 별도의 동력장치가 필요하다는 단점이 있다.<sup>5,6)</sup> 이러한 MBR의 단점을 해결하기 위하여 여과효율이 좋으면서도 경제적인 부직포 여과막 생물반응조가 연구되었는데,<sup>7,8)</sup> 이 공법에서는 한 반응조에 다 폐수를 연속적으로 주입시키면서 간헐적으로 포기시켜 질소를 제거하는 방법<sup>9)</sup>도 있지만, 두 반응조를 교대로 포기시키면서 폐수를 주입시키면 질소 제거효율을 향상시킬 수 있다.<sup>10,11)</sup>

본 연구에서는 부직포 여과막 생물반응조가 미생물을 고농도로 유지할 수 있는 장점을 이용하여 미생물의 내생호흡 시

생성되는 유기물을 탈질에 이용하는 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 부직포 여과막 주머니가 설치된 두 개의 동일한 반응조에 각각 유입펌프, 포기장치, timer 등을 연결시켜 폐수의 주입 및 포기가 교차하여 간헐적으로 진행되도록 하였다. 반응조는 내경이 190 mm이고 높이가 740 mm인 원통형의 투명한 아크릴관으로 제작되었고, 처리수의 흐름을 원활하게 하기 위하여 반응조의 하단은 45°로 경사지게 제작되었다. 반응조의 유효용적은 15 L이며, 반응조 내에는 유효면적이 0.29 m<sup>2</sup>인 내경 170 mm의 원통형 부직포 여과막을 설치하였다. 포기를 위하여 부직포 주머니의 바닥에 산기관을 설치하였으며, 비포기 기간에 슬러지가 침전하는 것을 방지하기 위해서 교반기(PL-S20, Poong Lim, Korea)를 설치하여 100 rpm의 속도로 교반하였다. 부직포가 막혀 수위가 상승하는 것을 방지하기 위하여 바닥으로부터 63 cm 높이에 월류관을 설치하였지만 실험기간동안 한번도 이용된 적이 없었다. 포기장치(ROA-P101-AC, MFG Corp., U.S.A)와 교반기(PL-S20, Poong Lim, Korea)는 timer에 연결하여 on/off 시킴으로써 포기/비포기 시간비를 제어할 수 있도록 하였으며, 실험장치는 20℃의 항온실에 설치하였다. 여과막으로 사용된 부직포는 PET(polyester)와 PP(polypropylene)을 약 65 : 35의 비로 혼합하여 제조한 것으로, 두께는 6 mm이고 단위중량은 1.06 kg/m<sup>2</sup>이다.

### 2.2. 유입폐수

실험에 사용된 유입폐수는 1시의 음식물 쓰레기 처리장에서 발생하는 침출수를 TCOD 농도가 300 mg/L 정도 되도록 수돗물로 희석시킨 다음, NH<sub>4</sub>Cl을 첨가하여 C/N 비를 조절하고 NaHCO<sub>3</sub>로 알칼리도를 보충한 것으로, 그 특성이 Table 1에 주어져 있다.

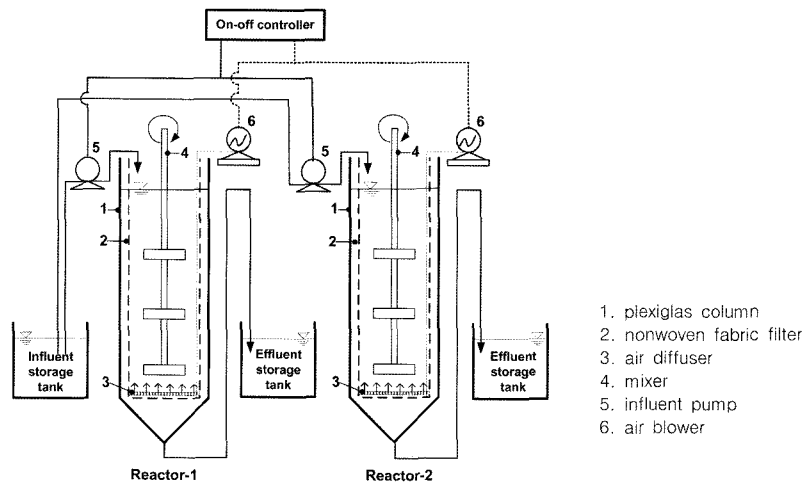


Fig. 1. Schematic diagram of the nonwoven fabric filter bioreactor system.

**Table 1.** Characteristics of the influent wastewater  
(unit: mg/L except pH)

Parameter	Range(average)
pH	6.99 ~ 8.09(7.56)
Alkalinity	210 ~ 860(477)
TBOD	143 ~ 267(209)
SBOD	125 ~ 240(187)
TCOD	304 ~ 335(306)
SCOD	254 ~ 315(282)
TSS	9 ~ 27(18)
VSS	8 ~ 24(14)
TKN	55.4 ~ 155.7(96.1)
NH <sub>3</sub> -N	37.5 ~ 144.5(75.4)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.00 ~ 1.94(0.59)
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	0.00 ~ 1.06(0.01)
T-N	56.1 ~ 155.7(96.7)
T-P	1.09 ~ 13.95(2.59)

### 2.3. 실험방법

I시 S하수종말처리장에서 채취한 반송슬러지를 부직포 여과막 주머니에 채워 MLSS 농도가 약 2,000 mg/L 정도 되도록 한 후, 유입수를 60 L/day(각 반응조별로는 30 L/day)의 율로 주입하여 체류시간이 12시간이 되도록 하였다. 각 반응조는 1시간 간격의 비포기 기간에만 유입수가 주입되므로 주입 시의 체류시간은 6시간이 된다.

과거의 연구결과<sup>9)</sup> 간헐 포기식 부직포 여과막 생물반응조로 하수를 처리하는 경우에 질소 제거를 위한 최적 포기/비포기 시간비가 60분/60분으로 구명되었으므로 본 연구에서도 교차 간헐 포기의 포기/비포기 시간비를 60분/60분으로 고정하였다.

반응조는 교대로 간헐적으로 폐수가 주입되고 포기되도록 운전하였다. 즉, 유입수는 슬러지의 침전을 방지하기 위하여 교반기가 100 rpm으로 작동되고 비포기되는 반응조에만 유입시켜 탈질을 위한 탄소원으로 이용되도록 하고, 포기되는 반응조에는 유입수 주입을 중단하여 질산화가 잘 일어나도록 하였다.

실험은 반응조의 MLSS 농도를 약 5,500 mg/L, 10,000 mg/L 및 15,000 mg/L로 유지한 3단계로 실시되었다. 유입수의 TCOD 농도는 Table 1에 제시된 바와 같이 약 300 mg/L로 유지하였으며, 2.2절에 언급된 바와 같이 NH<sub>4</sub>Cl을 첨가하여 유입수의 TCOD/TKN 비가 5, 4, 3 및 2 g TCOD/g TKN가 되도록 조정하였다.

처리수는 수두 차에 의하여 자연적으로 여과막을 통과하여 반응조 하부로 유출되었으며, 두 반응조의 처리수는 1일간 함께 수집한 다음 분석하였다.

### 2.4. 분석

유입수 및 처리수는 Standard Methods<sup>12)</sup>와 우리나라의 수질오염공정시험법<sup>13)</sup>에 준하여 필요한 항목을 일주일에 3회

씩 분석하였으나, SBOD, VSS 및 T-P는 본 연구에서의 중요성이 크지 않으므로 주 1회씩 분석하였다. NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 농도는 ion chromatography(Young Lin Instrument, Waters 432 Conductivity Detector)로 측정하였으며, 반응조의 DO 농도는 포기 및 비포기 기간의 중간시점에 DO meter(YSI model 58)로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

반응조의 MLSS 농도를 약 5,500 mg/L, 10,000 mg/L 및 15,000 mg/L의 3단계로 유지하면서 유입수의 TCOD/TKN 비를 5, 4, 3 및 2로 점감시켜 716일간 실시한 실험에서 MLSS 농도를 식중에 의한 최초의 농도인 약 2,300 mg/L에서 5,500 mg/L까지, 5,500 mg/L에서 10,000 mg/L까지, 그리고 10,000 mg/L에서 15,000 mg/L까지 증식시키는 데 소요된 139일을 제한 나머지 정상기간 동안의 반응조 운전상태를 요약하면 Table 2와 같다. 두 반응조 간에 MLSS 및 DO 농도에 차이가 있었지만 유의할만한 차이는 아니었다. Table 2의 자료에 의하면 실험이 처음 의도한 조건에 매우 근접한 상태에서 진행되었음을 알 수 있으며, 따라서 차후 자료에서는 유입수의 TCOD/TKN 비를 5, 4, 3 및 2로 표기하였다.

### 3.1. 유기물 제거

I, II 및 III단계 실험에서의 평균 F/M 비가 각각 0.112, 0.060 및 0.041 kg COD/kg MLSS-day로 계산되어 과거의 연구<sup>7~11)</sup>에서와 마찬가지로 부직포 여과막 생물반응조에서는 MLSS 농도를 높게 유지할 수 있기 때문에 F/M 비를 낮게 할 수 있다는 장점을 확인하였다.

Table 3에 각 실험단계별로 처리수의 TCOD, TBOD 및 TSS 제거효율을 나타내었는데, Table 1에 제시된 유입폐수의 수질과 관련시켜 계산하면 모든 실험단계에서 평균적으로 TCOD 제거효율은 95% 이상, TBOD 제거효율은 98% 이상, 그리고

**Table 2.** Average operational conditions of the reactors

Exp. stage	Influent TCOD/TKN ratio	Exp. period (days)	MLSS conc. (mg/L)	MLVSS /MLSS	DO conc.(mg/L)	
					Aeration period	Non-aeration period
I (MLSS=5,500 mg/L)	5.0	52	5,623	0.909	7.9	0.11
	4.0	72	5,542	0.908	7.6	0.08
	3.1	84	5,522	0.906	7.6	0.09
	2.1	79	5,535	0.914	7.4	0.10
II (10,000 mg/L)	5.0	31	10,290	0.903	7.1	0.09
	4.0	27	10,255	0.904	7.1	0.09
	3.0	47	10,195	0.906	7.1	0.09
	2.0	37	10,245	0.904	7.1	0.09
III (15,000 mg/L)	5.1	47	15,055	0.899	7.1	0.10
	4.1	49	15,110	0.894	7.2	0.13
	3.1	28	15,055	0.896	7.2	0.14
	2.0	24	14,630	0.895	7.2	0.16

**Table 3.** Organic matter removal efficiency of the nonwoven fabric filter bioreactors

Exp. stage	Influent TCOD/TKN ratio	TCOD		TBOD		TSS	
		Eff. conc.(mg/L)	R.E.**(%)	Eff. conc.(mg/L)	R.E.(%)	Eff. conc.(mg/L)	R.E.(%)
I (MLSS = 5,500 mg/L)	5	8.0~18.0(13.4)*	95.7	1.2~4.7(2.8)	98.5	0.0~1.8(0.9)	95.3
	4	8.0~22.0(14.3)	95.3	0.2~3.9(2.0)	99.0	0.0~2.2(1.0)	94.7
	3	10.5~19.0(13.4)	95.6	1.3~6.2(3.5)	98.3	0.4~1.4(0.9)	95.0
	2	6.4~13.1(10.4)	96.6	2.5~6.1(4.2)	98.0	0.2~2.8(1.1)	92.1
II (10,000 mg/L)	5	6.8~9.5(7.7)	97.5	1.2~5.7(2.6)	98.8	0.8~3.0(1.7)	91.9
	4	6.6~9.2(7.9)	97.4	1.2~2.8(2.2)	99.0	0.8~1.4(1.2)	94.0
	3	7.6~10.9(9.1)	97.0	1.7~2.8(2.0)	99.1	0.8~1.0(0.9)	94.4
	2	8.4~14.0(9.3)	97.0	1.6~2.4(1.9)	98.9	1.0~1.3(1.2)	93.3
III (15,000 mg/L)	5	6.4~13.2(9.0)	97.0	0.2~5.9(1.6)	99.3	0.8~1.0(0.9)	95.3
	4	4.8~11.2(7.7)	97.5	0.3~1.3(1.1)	99.5	0.7~0.8(0.7)	96.1
	3	11.2~12.9(12.4)	96.0	2.1~3.2(2.8)	98.8	0.8~1.0(0.9)	95.0
	2	8.8~14.5(12.7)	95.8	1.8~3.4(2.9)	98.7	1.0~1.8(1.1)	94.2

\* average in ( ), \*\* removal efficiency based on average value

TSS 제거효율은 92% 이상을 나타냄으로써 본 연구에 사용된 부직포 여과막 생물반응조가 유기물 제거에 매우 효율적임을 알 수 있으며, 이는 높은 MLSS 농도에 의한 낮은 F/M 비의 유지, 부직포 여과막에 의한 SS의 철저한 제거 등에 그 원인이 있음이 과거의 연구결과<sup>9~11)</sup>에서 언급되었다. 또한 실험에서 채택된 MLSS 농도나 유입수의 TCOD/TKN 비에 따른 유기물 제거효율 간에 큰 차이가 없어 반응조가 유기물 제거효율을 안정적으로 높게 유지할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.2. 미생물 성장계수 값

실험과정에서 제거된 COD의 양, 인위적으로 폐기된 MLSS의 양, MLSS 농도 측정에 사용된 MLSS의 양, 그리고 처리수에 존재하는 SS의 양에 근거하여 각 실험단계별로 실제 미생물 성장계수 값( $Y_{obs}$ )을 계산한 결과 I 및 II단계 실험에서는 각각 평균 0.312 및 0.325 mg MLSS/mg COD의 비슷한  $Y_{obs}$  값이 관측되었으며, III단계 실험에서는 평균 0.212 mg MLSS/mg COD로 계산되어 전체적으로 평균 0.283 mg MLSS/mg COD의  $Y_{obs}$  값을 얻었다.

Table 1에 주어진 바와 같이 본 연구에 사용된 유입폐수는 종속영양균의 성장을 위한 기질, 즉 전자공여체가 될 수 있는 유기물과 독립영양균을 위한 전자공여체로 이용될 수 있는 환원상태의 질소화합물을 함유하기 때문에 반응조에는 종속영양균과 독립영양균이 모두 존재할 수 있지만 유입수의 TCOD 농도가 304~335 mg/L의 거의 일정한 값을 가진 반면 TKN 농도는 유입수의 C/N 비에 따라 약 55~156 mg/L로 TCOD 농도보다 낮았을 뿐만 아니라 독립영양균의 성장계수 값은 종속영양균의 성장계수 값보다 매우 낮기 때문에<sup>3,16)</sup> 반응조에 존재하는 미생물의 대부분은 종속영양균으로 볼 수 있다.

미생물 성장계수 값은 미생물의 종류, 기질의 특성, 성장환경, 미생물종의 구성 등에 따라 달라, 종속영양균이 호기성 상태에서 탄수화물을 분해시킬 때 COD값으로 제거된 탄수

화물 1 mg당 0.48~0.72 mg의 미생물체가 생성되는데,<sup>14)</sup> 미생물체(biomass)의 구성식을  $C_5H_7O_2N$ 으로 가정하면 미생물체 1 g은 1.42 g의 COD에 해당하므로<sup>3,14)</sup> 제거되는 탄수화물 1 g당 0.34~0.51 g의 미생물체가 생성되는 셈이 된다. 참고문헌<sup>15)</sup>에서도 종속영양 미생물들의 대표적인 성장계수 값으로 0.4 g VSS/g COD를 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서 측정된 전체 평균 0.283 mg MLSS/mg COD의  $Y_{obs}$  값이 낮은 값을 알 수 있으며, 이는 본 연구에서 사용된 부직포 여과막 생물반응조에서 MLSS 농도를 높게 유지함으로써 F/M 비를 낮게 유지할 수 있었는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. Bhatta 등<sup>10)</sup>도 MBR에서 MLSS 농도를 높게하여 SRT를 500일로 증가시켰을 때 슬러지 생성계수가 0.04~0.09 kg MLSS/kg BOD의 낮은 값을 보인 것으로 보고하였다.

### 3.3. 질산화

Table 1에 주어져 있는 유입폐수는 음식물 쓰레기 침출수를 수돗물로 희석시킨 다음,  $NH_4Cl$ 을 첨가하여 C/N 비를 조절하고  $NaHCO_3$ 를 첨가하여 알칼리도를 보충한 것이기 때문에 유입폐수 내의 유기성 질소(TKN값과  $NH_3-N$ 값의 차이)는 원 침출수 내에 존재하던 것이며, 그 값은 Table 1에서 보는 바와 같이 평균 20 mg/L 이하이다. 따라서 유입폐수의 TKN은 대부분이  $NH_3-N$ 이다. 그리고 유입폐수는  $NO_3^-N$ 와 특히  $NO_2^-N$ 을 낮은 농도로 함유하였기 때문에 유입폐수의 T-N 농도는 TKN 농도와 거의 비슷한 값을 나타내었다.

유입수의 유량 및 TKN 농도, 그리고 반응조의 부피로부터 질소 용적부하(kg TKN/m<sup>3</sup>-day)를 계산한 결과 유입수의 TKN 농도 차이로 조금씩 차이는 있었지만 평균적으로 모든 실험단계에서 유입수 TCOD/TKN 비 5에서는 121.3, 4에서는 153.4, 3에서는 200.3, 그리고 2에서는 300.7 g TKN/m<sup>3</sup>-day 이었다. 그러나 Fig. 2에 도시된 바와 같이 질소에 대한 F/M 비, 즉 N/M 비(g TKN/g MLSS-day)는 MLSS 농도의 차이로

**Table 4.** Effects of MLSS concentration and influent TCOD/TKN ratio on nitrogen removal by nonwoven fabric filter bioreactors

Exp. stage	Influent TCOD/TKN ratio	TKN			NO <sub>x</sub> -N		T-N		
		Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	R.E.* (%)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	R.E. (%)
I (MLSS = 5,500 mg/L)	5	60.4	1.4	97.7	0.5	11.4	60.9	12.8	79.0
	4	76.4	0.8	99.0	0.7	16.3	77.1	17.2	77.7
	3	100.0	1.8	98.2	1.2	27.8	101.2	29.6	70.8
	2	149.0	12.8	91.4	0.6	77.2	149.6	89.9	39.9
II (10,000 mg/L)	5	61.4	1.0	98.4	0.0	6.3	61.4	7.3	88.1
	4	78.9	1.1	98.6	0.0	9.3	78.9	10.4	86.3
	3	100.4	1.6	98.4	0.0	20.8	100.4	22.4	77.7
	2	151.9	3.1	98.0	0.0	66.4	151.9	69.5	54.2
III (15,000 mg/L)	5	60.2	0.5	99.2	0.0	4.4	60.2	5.0	91.7
	4	75.3	0.0	100.0	1.1	16.3	76.3	16.3	78.6
	3	100.0	0.0	100.0	1.4	33.1	101.4	33.1	67.4
	2	150.2	0.3	99.8	1.4	76.1	151.6	76.4	49.6

\* R.E. : removal efficiency based on average value

I단계 실험에서는 0.024~0.059, II단계 실험에서는 0.013~0.033, 그리고 III단계 실험에서는 0.009~0.023 g TKN/g MLSS-day로 반응조의 MLSS 농도 및 유입수의 TCOD/TKN 비에 따라 변화하였다.

Table 4에 주어진 자료를 보면 MLSS 농도가 5,500 mg/L 이고 유입수의 TCOD/TKN 비가 2인 경우만 제외하고 유입수의 TCOD/TKN 비 및 MLSS 농도에 관계없이 TKN 제거 효율이 98% 이상의 높은 값을 나타내었는데, 이는 유기물의 경우와 마찬가지로 실험기간이 경과하여 MLSS 농도가 높아 질수록 Fig. 2에 도시된 바와 같이 N/M 비가 낮아짐은 물론 MLSS 중에 질산화 미생물이 증가한 데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. MLSS 농도가 5,500 mg/L이고 유입수의 TCOD/TKN 비가 2이었던 경우에는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 N/M 비가 0.059 g TKN/g MLSS-day로 대단히 높아 질산화가 충분히 진행되지 않은 것으로 추정된다.

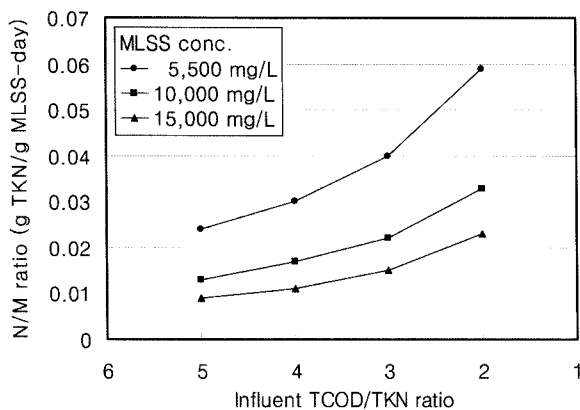
포기 시의 DO 농도는 Table 2에 제시된 바와 같이 7~8 mg/L로 유지되었는데 Table 4에서 보는 바와 같이 TKN 제

거효율이 한 경우만 제외하고 약 98% 이상으로 높게 유지된 것으로 보아 산소는 충분히 공급된 것으로 판단된다. 그러나 실험에 사용된 교차 간헐 포기식 부직포 여과막 생물반응조에서는 포기와 비포기가 한 반응조에서 교대로 일어나기 때문에 포기기간 중 포기를 과다하게 시켜 비포기기간의 초기에 반응조 내에 용존산소가 고농도로 잔류하면 탈질공정에 저해작용을 일으킬 수 있으므로 과도한 포기에 유의해야 한다.

유입폐수 내의 환원성 상태의 질소(TKN)는 질산화를 거쳐 탈질되는데, Table 4에 주어진 분석자료로부터 직접 질산화 효율을 알 수 없으므로 반응조 내에 유입되는 TKN의 일부는 미생물의 성장에 이용되고, 일부는 질산화된 다음 탈질되며, 일부는 제거되지 않고 처리수에 존재하게 되므로 식 (2)와 같이 제거된 TKN 중에서 미생물의 성장에 이용된 것과 처리수에 남아있는 것을 제한 것이 질산화된 것으로 가정하여 간접적으로 반응조에서의 질산화 효율을 추정하였다.

$$\text{Influent TKN} = \text{Nitrified TKN} + \text{Effluent TKN} + \text{TKN for cell growth} \quad (2)$$

반응조 내의 MLSS가 모두 활성이 있는 미생물(active biomass)인 경우에 미생물의 분자식을 C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>O<sub>2</sub>N으로 가정한다면 12.4%의 N을 함유하게 되나 실제 MLSS는 그러한 상태가 아니므로 연구기간 중 8회에 걸쳐 MLSS의 N 함량을 측정 한 결과 8.30~8.90%(평균 8.61%)의 N 함량을 나타내었다. 그리고 반응조를 일정한 MLSS 농도에서 정상상태로 유지하기 위해서는 성장하는 MLSS를 제거해야 하며, 본 연구의 실험에서 MLSS는 인위적 폐기, 분석용 시료, 그리고 처리수의 SS로 제거되었다. 단, 인위적으로 폐기되는 MLSS의 양은 실험 날짜에 따라 차이가 있었으나 유입수의 유기물 농도와 유기물 제거효율이 거의 동일하므로 F/M 비가 상이한 실험단계별로만 상이한 것으로 하였다.



**Fig. 2.** Applied N/M ratios at various influent C/N ratios.

**Table 5.** Average nitrification efficiency of the nonwoven fabric filter bioreactors

Exp. stage	Influent TCOD/TKN ratio	TKN removed (mg/L)	N for cell growth (mg/L)	TKN for nitrification (mg/L)	TKN nitrified (mg/L)	Nitrification efficiency (%)
I (MLSS=5,500 mg/L)	5	59.0	7.5	52.9	51.0	96.4
	4	75.6	7.5	68.9	67.4	97.8
	3	98.2	7.5	92.5	89.5	96.8
	2	136.2	7.5	141.5	128.1	90.5
II (10,000 mg/L)	5	60.4	7.9	53.5	52.0	97.2
	4	77.8	7.9	71.0	69.9	98.5
	3	98.8	7.9	92.5	90.9	98.3
	2	148.8	7.9	144.0	140.9	97.8
III (15,000 mg/L)	5	59.7	4.8	55.4	54.9	99.1
	4	75.3	4.8	70.5	69.4	98.4
	3	100.0	4.8	95.2	93.8	98.5
	2	149.9	4.8	145.4	143.7	98.8

이들에 근거하여 반응조에서의 질산화 효율을 계산한 결과 Table 5에 제시된 바와 같이 MLSS 농도가 5,500 mg/L 이고 유입수의 TCOD/TKN 비가 2인 경우의 90.5%를 제외하고 모두 96% 이상의 높은 값을 나타내었으며, 이는 Table 4에 주어진 TKN 제거효율보다 평균 0.9% 낮은 값이었다.

Table 2 및 Table 5의 자료를 이용하여 반응조에서의 질산화율(nitrification rate)을 계산한 결과 I단계 실험에서는 유입수의 TCOD/TKN 비가 5에서 2까지 점점 감소함에 따라 질산화율은 0.0196 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g MLVSS-day에서 0.0506 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g MLVSS-day까지 증가하였으며, II 및 III단계 실험에서는 MLSS 농도가 더 높게 유지됨으로써 각각 0.0112~0.0343 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g MLVSS-day 및 0.0081~0.0219 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g MLVSS-day의 낮은 값으로 계산되었다. Carrera 등<sup>17)</sup>은 MLE(modified Ludzack-Ettinger)공법으로 암모니아 농도가 매우 높은 폐수를 처리한 결과 유입수의 COD/N 비 3.4 및 2.1에서 각각 0.029 및 0.047 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g VSS-day의 질산화율을 얻어 본 연구에서 MLSS 농도가 5,500 mg/L로 유지된 I단계 실험에서의 질산화율과 비슷한 값을 나타내었으며, 유입수의 COD/N 비와 질산화율(r<sub>nit</sub>, g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g VSS-day) 간에 식 (3)의 관계가 성립한다고 보고하였다.

$$r_{nit} = 0.0323 + 0.33e^{-1.660(COD/N)} \quad (3)$$

본 연구의 I단계 실험 결과에 식 (3)을 적용하면 질산화율이 유입수의 TCOD/TKN 비가 5인 경우에는 0.0324, 그리고 2인 경우에는 0.0684 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g VSS-day로 계산되어 각 경우의 실제 값 0.0196 및 0.0506 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g VSS-day보다 약 1.5배 높는데, 이는 각 연구에서 채택된 MLSS 농도의 차이에 주 원인이 있는 것으로 판단된다. Tseng 등<sup>18)</sup>의 실험에서도 C/N 비 3.7에서 질산화 속도가 0.051 g N/g VSS-day로 측정되어 식 (3)에 의한 값 0.0344 g N/g VSS-day보다 약 1.5배 높았다.

**Table 6.** Denitrification loading and denitrification rate of the reactors

Exp. stage	Influent TCOD/TKN ratio	Denitrification load (g NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/g MLVSS-day)	Denitrification efficiency (%)	Denitrification rate (g NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/g MLVSS-day)
I (MLSS=5,500 mg/L)	5	0.0200	77.6	0.0155
	4	0.0268	75.8	0.0203
	3	0.0358	68.9	0.0247
	2	0.0506	39.7	0.0201
II (10,000 mg/L)	5	0.0113	88.0	0.0099
	4	0.0151	86.7	0.0131
	3	0.0197	77.1	0.0152
	2	0.0304	52.9	0.0162
III (15,000 mg/L)	5	0.0081	92.0	0.0075
	4	0.0103	76.5	0.0079
	3	0.0139	64.7	0.0090
	2	0.0219	47.0	0.0103

### 3.4. 탈질

실험에 사용된 유입폐수와 처리수는 MLSS 농도가 약 5,500 mg/L로 유지된 I단계 실험에서 유입수의 TCOD/TKN 비가 5인 경우에만 각각 0~1.06 mg/L(평균 0.05 mg/L) 및 0~0.89 mg/L(평균 0.25 mg/L)의 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N을 함유한 것으로 측정됨으로써 측정된 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>는 거의 모두 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 상태였다.

MLSS 농도 및 유입수의 TCOD/TKN 비의 변화에 따라 처리수의 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N 농도의 변화를 나타낸 Table 4를 보면 세 실험단계에서 모두 유입수의 TCOD/TKN 비가 감소할수록 처리수의 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N 농도가 증가하였으며, 특히 유입수의 TCOD/TKN 비가 2인 경우에는 처리수의 평균 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N 농도가 I, II 및 III단계 실험에서 각각 77.2 mg/L, 66.4 mg/L 및 76.1 mg/L로 크게 증가함으로써 탈질에 필요한 유기물이 많이 부족하였음을 알 수 있다.

Table 5에 주어진 바와 같이 반응조에서 제거된 TKN의 양에서 MLSS 증가량과 미생물의 분자식(C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>O<sub>2</sub>N)으로부터 계산된 미생물의 증식에 소비된 질소의 양을 제하면 질산화된 질소의 양이 되며, 이 값에서 처리수의 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N의 양을 빼면 탈질된 질소의 양이 된다. 질산화된 TKN 값과 Table 4에 주어진 처리수의 NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N 값으로부터 탈질효율을 계산하여 Table 6에 제시하였는데 Table 4에 주어진 T-N 제거효율과 비교하면 반응조의 MLSS 농도 및 유입수의 TCOD/TKN 비에 따라 차이는 있지만 미생물 합성에 소모된 질소량 때문에 T-N 제거효율이 탈질효율보다 전체적으로 평균 1.2% 더 높은 값을 보였다.

Table 6의 탈질효율을 그림으로 나타낸 Fig. 3을 살펴보면 유입수의 TCOD/TKN 비가 감소할수록 탈질효율이 감소하고, 특히 유입수의 TCOD/TKN 비가 2인 경우에 탈질효율이 크게 감소함으로써 탈질을 위한 전자공여체가 부족하였음을 알 수 있다. MLSS 농도가 10,000 mg/L로 유지된 II단계 실험에서의 탈질효율이 MLSS 농도가 5,500 mg/L로 유지된 I단계 실험의 탈질효율에 비하여 8.2~13.2%, 평균 10.7% 더 높은 결과를 보였는데, MLSS 농도 외의 실험조건이 거의

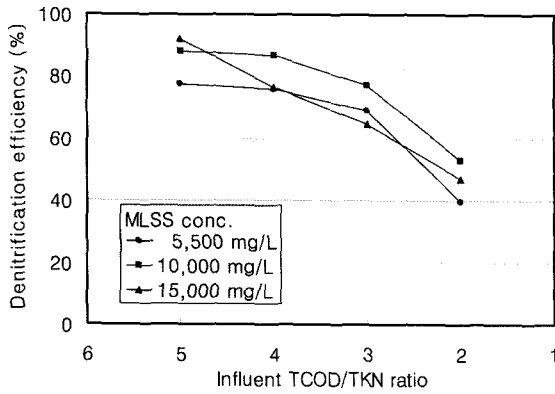


Fig. 3. Denitrification efficiency at various MLSS concentrations and influent TCOD/TKN ratios.

동일하였다는 점을 생각하면 II단계 실험에서는 I단계 실험에 비하여 F/M 비가 낮아 미생물의 자산화가 더 왕성하였으며, 이 때 생성된 미생물 분해산물이 탈질을 위한 전자공여체로 작용한 것으로 판단된다. 그러나 MLSS 농도가 15,000 mg/L로 유지된 III단계 실험에서는 I 및 II단계 실험과 달리 탈질효율이 유입수의 TCOD/TKN 비에 거의 반비례하여 직선적으로 감소하는 현상을 나타내었으며 탈질효율이 MLSS 농도가 5,500 mg/L인 경우에 비하여 -4.2~14.4%, 평균 4.6% 더 높고 MLSS 농도가 10,000 mg/L인 경우에 비하여 도리어 탈질효율이 평균 6.1% 낮은 결과를 나타내었다.

3.1절에서 언급된 바와 같이 III단계 실험에서 F/M 비가 0.041 kg COD/kg MLSS-day로 가장 낮게 유지되었는데, F/M 비가 낮을수록 미생물의 자산화에 의하여 미생물 생성량이 감소하고 VSS의 분해 및 FSS의 축적으로 MLVSS/MLSS 비가 감소한다.<sup>14,19)</sup> 본 연구에서 각 실험단계의 유입수의 TCOD/TKN 비에 따른 MLVSS/MLSS 비를 측정된 결과 Table 2에 주어진 바와 같이 III단계 실험에서의 MLVSS/MLSS 비가 평균 0.896으로 가장 낮게 나타났으나 I 및 II단계 실험에서의 MLVSS/MLSS 비에 비하여 큰 차이를 보이지는 않았다. 과거의 연구결과<sup>20)</sup>에 의하면 슬러지를 인위적으로 폐기시키지 않는 부직포 여과막 생물반응조에서는 폐수처리 기간이 경과할수록 MLSS 농도는 증가하지만 활성 미생물의 분율이 점점 감소하는데 이의 원인을 미생물에 의하여 분해되지 않는 불활성 바이오매스(refractory inactive biomass)의 축적<sup>14)</sup>으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서 MLSS 농도가 15,000 mg/L로 가장 높았던 III단계 실험에서의 탈질효율이 MLSS 농도가 10,000 mg/L로 유지된 II단계 실험의 탈질효율보다 낮았던 것도 미생물에 의하여 분해되지 않는 불활성 바이오매스의 축적이 MLSS 농도의 증가에는 기여하였지만 탈질을 위한 탄소원으로 이용될 수 없었기 때문으로 판단된다. 따라서 앞으로 미생물 분해산물을 탈질의 탄소원으로 이용하는 데 최적의 MLSS 농도 또는 SRT에 대한 연구가 요구된다.

3.2절에서 설명된 바와 같이 Table 5에 주어진 질산화된 TKN의 양과 유입폐수의 유량 및 반응조의 MLSS 양으로부터 질산화율(nitrification rate)을 구할 수 있으며, 이 질산화율은 곧 Table 6에 주어진 탈질부하(denitrification loading)가 된다.

이 탈질부하에다 탈질효율을 고려하면 Table 6의 탈질율이 된다. Ha와 Huang<sup>21)</sup>은 0.07~0.10 g N/g VSS-day의 탈질부하에서 9.2~17.8%의 내생탈질효율을 얻었으며, Timmermans와 van Haute<sup>2)</sup>는 0.06~0.42 g N/g VSS-day의 탈질부하에서 내생탈질효율이 정상적인 탈질효율의 10% 정도이고 이 때의 내생탈질효율은 0.06 g N/g MLSS-day인 것으로 보고하였다. 본 연구의 실험단계간 실험조건의 주된 차이는 반응조의 MLSS 농도와 N/M 비이며 Table 3에서 보는 바와 같이 처리수의 TCOD 및 BOD 농도에서 이들 실험 간에 큰 차이가 없었으므로 II단계 및 III단계 실험에서의 탈질효율이 I단계 실험에 비하여 평균 10.7% 및 4.6% 더 높은 이유가 높은 MLSS 농도에 의한 낮은 F/M 비 때문에 미생물의 자산화에 의한 미생물 분해산물이 탈질을 위한 전자공여체로 이용된 데 있는 것으로 판단된다. Table 5에 주어진 질산화된 TKN의 양에다 Table 6의 탈질효율을 적용하여 탈질된 질소의 양을 계산한 다음 실험단계별로 비교하면 반응조의 MLSS 농도가 1,000 mg/L 증가함에 따라 I단계 실험과 II단계 실험의 결과로부터는 평균 2.655 mg/L의 율로, 그리고 I단계 실험과 III단계 실험의 결과로부터는 평균 0.754 mg/L의 율로 탈질이 향상됨으로써 앞에서 언급된 바와 같이 반응조의 MLSS 농도 증가에 비례하여 내생탈질효율이 증가하지 않음을 알 수 있다.

Burdick 등<sup>21)</sup>은 세포분해시 생성되는 유기물을 탈질에 이용하는 4단계 Bardenpho 공정의 두 번째 준호기조에서의 비탈질율( $q$ ; g  $\text{NO}_3^-$ -N/g VSS-day)을 식 (4)와 같이 SRT( $\theta_c$ )와 관련지을 수 있는 것으로 보고하였는데 SRT가 길수록, 즉 MLSS 농도가 증가할수록 비탈질율이 감소함을 나타낸다.

$$q = 0.12 \theta_c^{-0.706} \quad (4)$$

따라서 3.2절에서 설명된  $Y_{\text{obs}}$  값 계산시의 방법을 이용하여 본 연구에서의 I, II 및 III단계 실험에서의 SRT를 계산한 결과 각각 82일, 53일 및 120일의 값을 얻었으며, 이들 값을 식 (4)에 대입시켜 비탈질율을 계산한 결과 각각 0.0053, 0.0073 및 0.0041 g  $\text{NO}_3^-$ -N/g VSS-day의 값을 얻었는데, 이들을 Table 6에 주어진 탈질율과 비교하면 본 연구에서 계산된 탈질율이 식 (4)에 의하여 계산된 탈질율보다 전체적으로 평균 2.6배 정도 높게 나타났다.

Table 4에 주어진 총질소 제거효율을 Fig. 6에 주어진 탈질효율과 비교하면 거의 유사한 변화양상을 나타내며, 총질소 제거효율이 I단계 실험에 비하여 II단계 실험에서 6.9~14.3%, 평균 9.7% 높았으며, III단계 실험에서는 I단계 실험보다 평균 7.0% 높게 나타났다. 탈질효율과 마찬가지로 총질소 제거효율도 모든 실험단계에서 TCOD/TKN 비가 5에서 3으로 감소됨에 따라 점감하였으며, TCOD/TKN 비 2에서는 특히 크게 감소하였다.

### 3.5. pH와 알칼리도의 변화

질산화 과정에서는 알칼리도가 7.1 mg/mg  $\text{NH}_4^+$ -N의 율로 소비되고 탈질 시에는 알칼리도가 3.57 mg/mg  $\text{NO}_3^-$ -N의 율로 생성되므로<sup>1)</sup> 유입수의 TCOD/TKN 비가 5에서 2로 점점

**Table 7.** Computation of the alkalinity consumption/recovery during nitrification/denitrification in the bioreactors

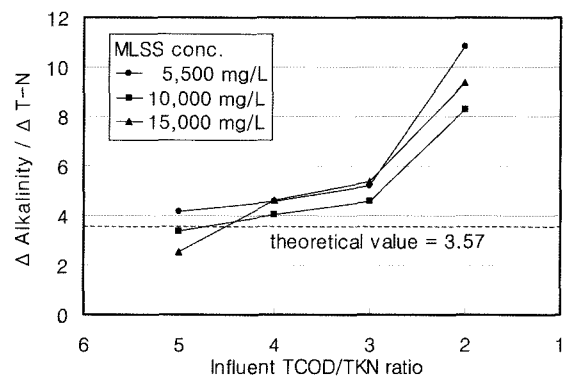
Exp. stage	Influent TCOD /TKN ratio	pH		Alkalinity (mg/L)		TKN nitrified (mg/L) ③	NO <sub>3</sub> -N denitrified (mg/L) ④	Alk. consumed for nitrification (mg/L) ⑤	Alk. recovered from denitrification (mg/L) ⑥	Alk. consumed (mg/L) ⑦	Alk. remaining (mg/L) ⑧
		Inf.	Eff.	Inf. ①	Eff. ②						
I	5	7.52	7.15	284	83	51.0	39.6	362	141	221	63
	4	7.70	7.32	387	112	67.4	51.1	479	182	297	90
	3	7.44	7.24	473	101	89.5	61.7	635	220	415	58
	2	7.53	7.25	749	103	128.1	50.9	910	182	728	21
II	5	7.56	7.43	302	120	52.5	46.2	373	165	208	94
	4	7.63	7.51	410	134	69.9	60.6	496	216	280	130
	3	7.70	7.39	484	125	90.9	70.1	645	250	395	89
	2	7.60	7.27	796	113	140.9	74.5	1,000	266	734	62
III	5	7.20	7.23	227	87	54.9	50.5	390	180	210	17
	4	7.64	7.74	411	133	69.4	53.1	493	190	303	108
	3	7.75	7.56	493	126	93.8	60.7	666	217	449	44
	2	7.76	7.32	825	120	143.7	67.6	1,020	241	779	46

감소할수록 유입수에 NaHCO<sub>3</sub>를 첨가하여 유입수의 알칼리도를 Table 7에 제시된 바와 같이 최저 227 mg/L에서 최고 825 mg/L까지 증가시켰다.

질산화 박테리아와 탈질 박테리아는 성장을 위한 최적 pH가 중성 부근이며<sup>1,3,14)</sup> Table 7에서 보는 바와 같이 실험 기간동안 유입수의 pH는 7.20~7.76으로 그리고 처리수의 pH는 7.15~7.74로 측정됨으로써 질산화 박테리아와 탈질 박테리아에 대한 pH의 영향은 없었던 것으로 판단된다.

Table 7은 Table 5와 Table 6에 주어진 질산화 및 탈질 자료에 근거하여 질산화 과정에서 소모된 알칼리도의 양(⑤란)과 탈질 과정에서 회수된 알칼리도의 양(⑥란)으로부터 전체 과정에서 소모된 알칼리도의 양(⑦란)을 추정한 다음 그 여유분(⑧란 = ①란 - ⑦란)을 실제 처리수 내에 존재하는 알칼리도의 양(②란)과 비교한 것으로, 처리수 알칼리도의 추정값이 실제 값에 상당히 근접하는 경우도 있었으나 그렇지 않은 경우도 있었다. 알칼리도가 50 mg/L 이하이면 pH가 불안정하게 될 우려성이 있으나<sup>14)</sup> 본 연구에서는 처리수의 알칼리도 최소값이 83 mg/L로 측정되어 유입폐수의 알칼리도 보충이 적절하였던 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Table 4와 Table 7에 주어진 자료로부터 제거된 T-N 단위무게당 소모된 알칼리도의 양( $\Delta$ alkalinity/ $\Delta$ T-N)을 계산하여 나타낸 것으로, 모든 실험단계에서 유입수의 TCOD/TKN 비가 감소할수록 알칼리도 소모량이 증가하는 경향을 나타내었으나, 유입수의 TCOD/TKN 비가 5에서 3으로 점감함에 따라 알칼리도 평균 소모량은 3.36 mg alkalinity/mg T-N에서 5.06 mg alkalinity/mg T-N으로 서서히 증가하였지만 TCOD/TKN 비가 2인 경우에는 9.50 mg alkalinity/mg T-N으로 크게 증가하는 현상을 나타내었는데, 이는 Table 5에서 보는 바와 같이 유입수의 TCOD/TKN 비가 낮아질수록 질산화되는 TKN의 양이 증가하여 알칼리도 소비량은 증가하지만 Table 6에 제시된 바와 같이 탈질효율이 저하하여 탈질에 의한 알칼리도 회수량이 감소하기 때문으로 판단된다.



**Fig. 4.** Alkalinity consumption at various MLSS concentrations and influent TCOD/TKN ratios.

음식물 쓰레기 침출수를 COD 농도가 약 2,500 mg/L되도록 희석시킨 다음 MLSS 농도가 10,000~12,000 mg/L 그리고 HRT가 2일로 유지되고 교대로 간헐적으로 포기되는 부직포 여과막 생물반응조로 처리한 과거의 연구<sup>11)</sup>에서도 유입수의 TCOD/TKN 비 10~5에서는 알칼리도 소모량이 3.12~3.49로 이론적인 값 3.57 g alkalinity/g T-N removed보다 약간 낮았으나, TCOD/TKN 비 3 및 2.8에서는 각각 4.63 및 4.87로 이론값 보다 높은 값을 나타내었는데 이는 본 연구에서 MLSS 농도를 10,000 mg/L로 유지한 II단계 실험의 결과와 유사하다.

#### 4. 결론

폐수를 생물학적으로 처리할 때 반응조의 MLSS 농도와 유입수의 C/N 비가 질소 제거효율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 60분/60분의 포기/비포기 시간비로 교차 간헐 포기는 2개의 부직포 여과막 생물반응조에서 MLSS 농도를 약 5,500 mg/L, 10,000 mg/L 및 15,000 mg/L의 3단계로 증가



시키고 음식물 쓰레기 침출수를 COD 농도가 약 300 mg/L 되도록 희석시킨 다음  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 을 첨가하여 TCOD/TKN 비를 5, 4, 3 및 2로 감소시키면서 처리한 실험에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 본 연구에서 채택된 부직포 여과막 생물반응조에서는 MLSS 농도가 높아 F/M 비를 0.112 g COD/g MLSS-day 이하로 낮게 유지할 수 있었으며 또한 부직포 여과막에 의하여 SS가 철저히 제거됨으로써 평균 제거효율이 TCOD는 95% 이상, TBOD는 98% 이상, 그리고 SS는 92% 이상을 나타내었다.

2) 반응조에서의 낮은 F/M 비로 인하여 미생물 성장계수 ( $Y_{obs}$ ) 값이 0.212~0.325(평균 0.283) g MLSS/g COD의 낮은 값을 나타내었다.

3) 제거된 TKN량과 미생물 성장에 이용된 TKN량으로부터 질산화효율을 계산한 결과 MLSS 농도가 5,500 mg/L이고 유입수의 TCOD/TKN 비가 2인 경우의 90.5%를 제외하고 모두 96% 이상의 높은 값을 나타내었다.

4) 탈질효율은 유입수의 TCOD/TKN 비가 감소할수록 감소하였으며 특히 유입수의 TCOD/TKN 비가 2인 경우에 크게 악화되었다.

5) MLSS 농도가 5,500 mg/L로 유지된 경우에 비하여 MLSS 농도가 10,000 mg/L로 유지된 경우에 탈질효율이 평균 10.7% 더 높았으며, MLSS 농도가 1,000 mg/L 증가함에 따라 평균 2.66 mg/L의 율로 탈질율이 증가하였다. 그러나 MLSS 농도가 15,000 mg/L로 유지된 경우에는 평균 4.6% 더 좋았으며, 탈질율은 MLSS 농도가 1,000 mg/L 증가함에 따라 평균 0.754 mg/L의 율로 증가하였다.

6) 알칼리도 소모량은 유입수의 TCOD/TKN 비가 5인 경우에는 제거된 T-N 1 mg당 평균 3.36 mg로서 이론값인 3.57 mg에 가까웠으나 유입수의 TCOD/TKN 비가 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

## 사 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- U. S. EPA., Manual Nitrogen Control, EPA/625/R-93/010, Washington, D. C.(1993).
- Timmermans, P. and van Haute, A., "Denitrification with methanol; fundamental study of the growth and denitrification capacity of *Hyphomicrobium* sp.," *Water Res.*, **10**, 1249~1255(1983).
- Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, McGraw-Hill (2001).
- Abufayed, A. A. and Schroeder, E. D., "Kinetics and stoichiometry of SBR/denitrification with a primary sludge carbon source," *J. Water Pollut. Control. Fed.*, **58**, 398~405(1986).
- Buisson, H., Cote, P., Praderie, M., and Paillard, H., "The use of immersed membranes for upgrading wastewater treatment plants," *Water Sci. Technol.*, **37**(9), 89~95(1988).
- Choi, J. H., Dockko, S., Fukushi, K., and Yamamoto, K., "A novel application of a submerged nanofiltration membrane bioreactor(NF MBR) for wastewater treatment," *Desalination*, **146**, 413~420(2002).
- 조광명, "여과막 활성슬러지공법에 의한 유기성 폐수의 처리," 대한토목학회논문집, **28**(6), 119~133(1980).
- 임상호, 배민수, 조광명, "부직포 여과막 생물반응조를 이용한 하수의 처리," 한국물환경학회지, **19**(1), 99~107(2003).
- 황도연, 강복춘, 조광명, "간헐폭기식 부직포 여과막 생물반응조에서 폭기/비폭기 시간비가 하수의 유기물 및 질소 제거에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **25**(2), 258~265(2003).
- 이종호, 조광명, "교차 간헐 폭기식 부직포 여과막 생물반응조를 이용한 하수의 유기물 및 질소 제거," 대한환경공학회지, **26**(2), 184~190(2004).
- 안윤찬, 배민수, 이종호, 조윤경, 조광명, "교대로 간헐 포기되는 부직포 여과막 생물반응조에서 C/N비가 유기물 및 질소제거 효율에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **27**(5), 499~506(2005).
- APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington D. C., USA(1988).
- 환경부 고시 제 96-32호, 수질환경오염공정시험법(1996).
- Grady, Jr., C. P. L., Daigger, G. T., and Lim, H. C., *Biological Wastewater Treatment*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc.(1999).
- Metcalf & Eddy, Inc., *Wastewater Engineering : Treatment and Reuse*, 4th ed., McGraw-Hill(2003).
- Batta, C. P., Matsuda, A., Kawasaki, K., and Omori, D., "Minimization of sludge production and stable operational condition of a submerged membrane activated sludge process," *Water Sci. Technol.*, **50**(9), 121~128(2004).
- Carrera, J., Vicent, T., and Lafuente, "Effect of influent C/N ratio on biological nitrogen removal(BNR) from high-strength ammonium industrial wastewater," *Process Biochemistry*, **39**, 2035~2041(2004).
- Tseng, C. C., Potter, T. G., and Kooperman, B., "Effect of influent chemical oxygen demand to nitrogen ratio on a partial nitrification/complete denitrification process," *Water Res.*, **32**(1), 165~173(1998).
- Innocenti, L., Bolzonella, D., Pavan, P., and Cecchi,

- F., "Effect of sludge age on the performance of a membrane bioreactor: influence on nutrient and metals removal," *Desalination*, **146**, 4671~474(2002).
20. 정경은, 배민수, 조윤경, 조광명, "부직포 여과막 생물 반응조에서의 폐활성슬러지 감량화," 대한환경공학회지, **28**(1), 88~96(2006).
21. Burdick, C. R., Refling, D. R., and Stensel, H. D., "Advanced biological treatment to achieve nutrient removal," *J. Water Pollut. Control Fed.*, **54**, 1078~1086 (1982).