大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 17~24. 2005.

간헐포기식 부직포 여과막 생물반응조에서 체류시간 및 주기시간이 하수처리에 미치는 영향

김택수 · 배민수 · 조광명†

인하대학교 환경토목공학부

(2004년 6월 7일 접수, 2004년 12월 13일 채택)

Effects of Hydraulic Retention Time and Cycle Time on the Sewage Treatment of Intermittently Aerated Nonwoven Fabric Filter Bioreactor

Taek-Su Kim · Min-Su Bae · Kwang-Myeung Cho†

School of Environmental & Civil Engineering, Inha University

ABSTRACT : This study was carried out to investigate the removal efficiency of an intermittently aerated nonwoven fabric filter bioreactor fed continuously with domestic sewage. The hydraulic retention time (HRT) of the reactor was reduced from 12 hrs to 10 hrs to 8 hrs during an experimental period of 17 months. In order to search an optimum aeration/nonaeration time ratio for the nitrogen removal at each HRT, the cycle times of 3, 2 and 1 hr were tested at the aeration/nonaeration time ratio of 1. Then, the aeration/nonaeration time ratio was changed from 50 min/70 min to 40 min/80 min to 30 min/90 min at the cycle time of 2 hr which showed the best nitrogen removal.

During the experimental period, the effluent SS concentration was always below 1.2 mg/L with more than 95% of BOD removal efficiency. The highest nitrogen removal of 90.1% was observed at the aeration/nonaeration time ratio of 40 min/80 min at the HRT of 10 hr. Oxidation-reduction potential could represent the degree of the nitrification and denitrification reaction in the reactor.

Key Words : *Nonwoven Fabric Filter, Intermittent Aeration, Nitrification, Denitrification, Cycle Time*

요약 : 본 연구에서는 간헐적으로 포기되는 부직포 여과막 생물반응조에 하수를 연속적으로 주입하면서 수리학적 체류시간(HRT)을 12, 10 및 8시간으로 감소시키면서 17개월간 실험을 실시하였다. 먼저 각 HRT에서 질소 제거효율이 가장 좋은 포기/비포기 시간비를 찾기 위하여 포기/비포기 시간비 1에서 주기시간을 3, 2, 및 1시간으로 변화시키며 질소 제거효율을 비교한 후, 질소 제거효율이 가장 좋았던 2시간의 주기시간에서 포기/비포기 시간비를 다시 50분/70분, 40분/80분 그리고 30분/90분으로 변화시키면서 질소 제거효율을 비교하였다.

실험기간 동안 처리수의 SS농도는 항상 1.2 mg/L 미만으로 유지되었으며, BOD 제거효율은 95% 이상을 나타내었다. 모든 HRT에서 최대 질소 제거효율을 나타낸 포기/비포기 시간비는 40분/80분이었으며, HRT 10시간에서 질소 제거효율이 90.1%로 가장 높았다. 그리고 ORP가 반응조 내의 질산화 및 탈질 정도를 잘 나타냄을 알 수 있었다.

주제어 : 부직포 여과막, 간헐 포기, 질산화, 탈질, 주기시간

1. 서 론

재래식 활성슬러지공법은 슬러지 팽화나 슬러지 상승 등 운전상의 어려움이 있고 질소 및 인의 제거효율이 낮아 이를 개선할 수 있는 공법들의 개발이 요구된다. 막 결합형 생물 반응조(membrane bioreactor ; MBR)는 생물학적 처리 외에 막에 의한 고액분리가 가능하여 슬러지의 침전과 반송이 불필요하므로 시설을 소규모화 시킬 수 있으며, 반응조의 MLSS 농도를 높게 유지할 수 있어 양호한 수질의 처리수를 얻을 수 있다.[1,2] 그러나 막이 비싸고 막을 통한 저항이 높아 요구되는 투과량을 얻기 위해서는 동력이 필요하다는 단점이 있다.[3,4]

생물학적으로 질소를 제거하는 방법 중 간헐포기공법은 단일 반응조에서 질산화 반응을 위한 호기조건과 탈질을 위한 무산소조건을 교대로 제공하여 질소를 제거하는 방법으로,[5,6] 반응조 내의 호기 및 무산소 조건은 DO농도나 산화-환원전위(oxidation-reduction potential : ORP)를 측정하여 알 수 있다.[7] 특히 DO농도보다 ORP는 반응조 내의 미생물의 반응상태를 보다 정확하게 확인하는 데 이용될 수 있다.[8~10] 탈질이 시작되는 점과 완료되는 점은 ORP곡선에서 변곡점으로 나타난다.[11,12] 보통 mV 단위로 측정되는 ORP는 높은 양(+)의 값을 나타내면 유기물이 미생물에 의하여 CO_2와 H_2O로 분해되는 산화반응상태에 있다는 것을 뜻하며, 반대로 낮은 음(-)의 값을 나타내면 NO_2^-, NO_3^- 등이 전자수용체로 작용하는 환원반응상태에 있다는 것을 의미한다.[13]

† Corresponding author
E-mail: kmcho@inha.ac.kr
Tel: 032-860-7502 Fax: 032-867-0864

분리막으로 막(membrane) 대신 부직포를 이용하면 MBR의 장점을 살리면서 단점을 해소시킬 수 있을 뿐만 아니라,[14,15] 부직포 여과막 생물반응조를 간헐포기시키면 질소제거효율도 향상시킬 수 있다. 황 등[16]은 부직포 여과막을 갖춘 단일 생물막 반응조에다 침전시킨 하수를 연속주입시키면서 12시간의 체류시간에서 간헐포기시키며 주기시간 및 포기/비포기 시간비를 변화시키면서 질소 제거효율을 비교한 결과, 2시간의 주기시간에서 40분/80분의 시간비로 운전하였을 때 질소 제거효율이 83%로 가장 좋았다.

따라서 본 연구에서는 간헐 포기식 부직포 여과막 생물반응조의 체류시간을 12시간에서 10시간, 그리고 8시간으로 감소시키면서, 각 체류시간에서 주기시간과 포기/비포기 시간비의 변화에 따른 오염물 제거효율을 관찰하고, 각 조건에서 DO농도와 ORP의 변화를 관찰함으로써 최적 운전조건을 도출하였다.

2. 실 험

2.1. 실험장치

실험에 사용된 반응조는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 내경이 19 cm이고 높이가 74 cm인 원주형의 투명한 아크릴관으로 제작되었는데, 반응조 하부에는 부유물이 퇴적하는 것을 방지하기 위해 45°로 경사지게 하였다. 반응조의 총 유효용적은 15 L이며 반응조 내에는 유효면적이 0.29 m^2인 내경 17 cm의 원통형 부직포 여과막을 설치하였다. 포기와 혼합을 위하여 여과막 바닥에 산기관(diffuser)을, 그리고 비포기시의 교반을 위하여 교반기를 설치하였으며, 이들 포기장치와 교반기는 timer에 연결하여 on/off 제어가 가능하도록 하였다.

여과막으로 사용된 부직포는 polyester(PET)와 polypropylene(PP)를 약 65 : 35의 비로 혼합 제조되었으며, 두께는 6 mm 그리고 단위중량은 1.06 kg/m^2으로, Fig. 2에 제시된 바와 같이 섬유가닥이 무질서하게 배열된 수많은 층으로 이루어져 pore size가 일정하지 않으나 사진판독 결과 대략 100 μm로 추정되었다.

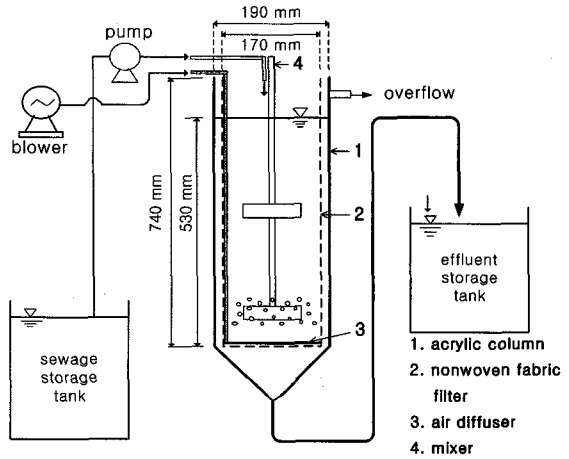

Fig. 1. Schematic diagram of the nonwoven fabric filter bioreactor.

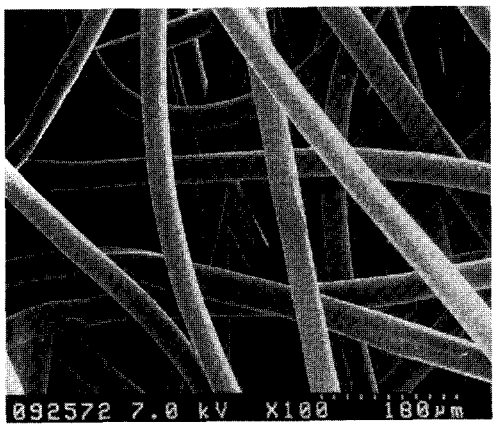

Fig. 2. The SEM photograph of the nonwoven fabric filter.

2.2. 실험방법

실험에 사용된 하수는 I시 J아파트에서 배출되는 하수를 1일간 침전시킨 것으로, 실험기간 중 그 특성을 분석하여 Table 1에 요약하였다.

실험은 20℃의 항온실에서 수리학적 체류시간(HRT)을 12, 10, 그리고 8시간으로 점감시키면서 수행되었는데, 유입수는 반응조 상부에 연속주입되어 부직포 여과막을 통과한 후 자연유출되도록 운전하였다. 12시간의 HRT에서는 반응조 내의 MLSS를 폐기시키지 않고 계속 증가시켰으며, 10시간의 HRT부터는 MLSS농도를 약 12,000 mg/L로 일정하게 유지하였다.

각 HRT에서는 최적 주기시간을 도출하기 위하여 Table 2에 제시한 바와 같이 포기/비포기 시간비가 1인 90분/90분, 60분/60분, 그리고 30/30분이 되도록 주기시간을 3, 2 및 1시간으로 변화시키면서 특히 질소 제거효율을 비교하였으며, 질소 제거효율이 가장 좋았던 2시간의 주기시간에서 포기/비포기 시간비를 다시 50분/70분, 40분/80분, 그리고 30분/90분으로 변화시키면서 질소 제거효율의 변화를 관찰하였다. 또한 반응조 내에서의 탈질반응 상태와 질소제거를 위한 최적의 포기/비포기 시간비를 확인하기 위하여 DO농도 및 ORP를 관찰하였다. 그러나 8시간의 HRT에서 부직포의 막힘현상으로 수위가 상승하여 30분/90분의 포기/비포기 시간비에서 실험을 마감하였다. 각 단계별 실험기간은 약 1개월로, 총 실험기간은 17개월이었다.

Table 1. Characteristics of the sewage used for the experiment (unit : mg/L except pH)

Item	Range	Average
pH	6.5 ~ 7.5	7.2
Alkalinity	175 ~ 274	232
TBOD	115 ~ 200	149
TSS	51 ~ 88	66
VSS	44 ~ 78	56
TKN	32.1 ~ 46.1	38.7
T-N	32.3 ~ 46.9	39.2
T-P	4.3 ~ 7.8	5.4

Table 2. Operating conditions at various cycle times and aeration/nonaeration time ratios

HRT(hr)	12			10			8		
Cycle time(hr)	3	2	1	3	2	1	3	2	1
Aeration / nonaeration (min/min)	90/90	60/60	30/30	90/90	60/60	30/30	90/90	60/60	30/30
Cycle time(hr)	2			2			2		
Aeration / nonaeration (min/min)	50/70	40/80	30/90	50/70	40/80	30/90	50/70	40/80	30/90

Table 3. Summary of the analytical methods

Item	Analytical method
pH	pH meter(ORION 720A)
DO	DO meter(YSI Model 58)
ORP	ORP meter(TOA RM-12P)
Alkalinity	Titration Method(Standard Methods ; 2320 B)
BOD	5-day BOD Test(Standards Methods ; 5210 B)
COD_{Cr}	Dichromate Reflux Method(Closed)(Standard Methods ; 5220 C)
SS	Korean Standard Methods for Water Pollution (Advantec GS-25)
TKN	Macro Kjeldahl Method(Standard Methods ; 4500-N_{org} B)
NO_2^--N	Ion Chromatography(Young Lin Instrument)
NO_3^--N	Ion Chromatography(Young Lin Instrument)
T-P	Korean Standard Methods for Water Pollution (Ascorbic Acid Reduction Method)

2.3. 분석

유입수 및 처리수에 대하여 Table 3에 주어진 바와 같이 NO_2^--N 및 NO_3^--N 농도는 ion chromatography(Young Lin Instrument, Water 432 Conductivity Detector)로, 그리고 나머지 항목은 Standard Methods[17]와 우리나라의 수질오염공정시험법[18]에 준하여 주 3회씩 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 2에 주어진 실험계획에 따라 약 17개월간 수행된 실험에서 획득된 각 실험 단계별 11~13개의 분석치를 산술평균하여 Fig. 3~Fig. 10에 제시하였다.

3.1. MLSS농도와 F/M비의 변화

Fig. 3은 운전조건별 반응조의 MLSS농도 그리고 F/M비의 변화를 나타낸 것이다. 12시간의 HRT에서는 반응조 내의 MLSS를 폐기하지 않았기 때문에 MLSS농도가 4,400 mg/L부터 10,300 mg/L까지 증가하였으나, 10시간 및 8시간의 HRT에서는 2일마다 반응조 내의 용액을 0.35 L씩 폐기시킨 결과 MLSS농도가 11,700 mg/L~12,440 mg/L로 유지되었으며, 모든 HRT에서 MLVSS/MLSS 비는 약 0.80 이었다. 여기서 MLSS농도는 측정이 불가능한 부직포에 부착된 미생물을 제외한 부유상태의 값이므로 실제 반응조 내의 미생물 농도는 더 높았을 것이다.

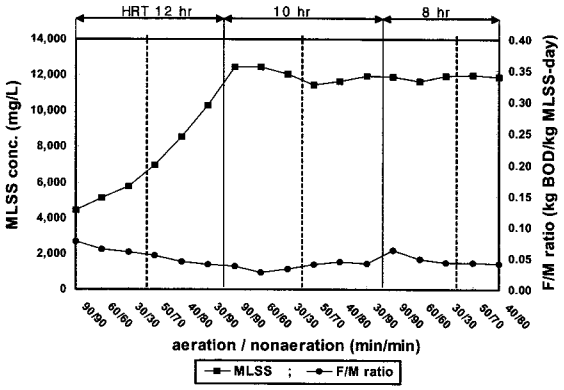

Fig. 3. MLSS concentration and F/M ratio in the bioreactor.

12시간의 HRT에서는 MLSS농도가 증가함에 따라 F/M비가 감소하였으며, MLSS농도가 약 12,000 mg/L로 유지된 10시간 및 8시간의 HRT에서는 대부분의 경우 F/M비가 0.04~0.05 kg BOD/kg MLSS-day로 낮게 유지되었으나, 8시간의 HRT에서 포기/비포기 시간비가 90분/90분일 때 유입수의 BOD농도가 높아 F/M비가 0.06 kg BOD/kg MLSS-day로 나타났다.

3.2 유기물과 SS의 제거

Fig. 4는 실험기간 중의 BOD의 농도 및 제거효율의 변화를 나타낸 것이다. 실제 하수를 이용하였기 때문에 유입수의 BOD농도는 Table 1에 제시된 바와 같이 최소 115 mg/L에서 최대 200 mg/L까지 변화를 보였지만, 유출수의 BOD농도는 평균 2.5 mg/L로 BOD 제거효율은 HRT와 포기/비포기 시간비에 관계없이 항상 95% 이상을 유지하였다.

Fig. 5는 실험기간 중의 SS의 농도 및 제거효율을 나타내는데, 유입수의 평균 SS농도는 66 mg/L이었고 유출수의 SS농도는 모든 HRT에서 항상 1.2 mg/L 이하로, SS 제거효율이 98 % 이상으로 나타났다. 이는 분리막으로 이용된 부직포와 부직포 표면 및 내부에 형성된 생물막에 의한 여과작용으로 SS의 유실을 막을 수 있었기 때문으로 판단된다.

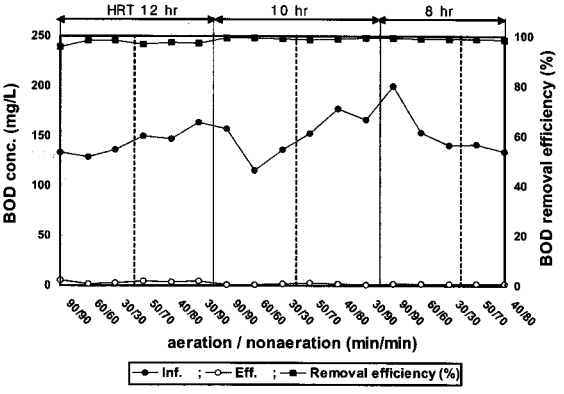

Fig. 4. TBOD removal at various HRTs and aeration/nonaeration time ratios.

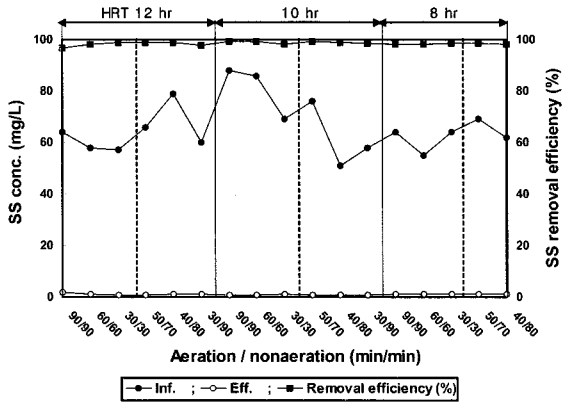

Fig. 5. SS removal at various HRTs and aeration/nonaeration time ratios.

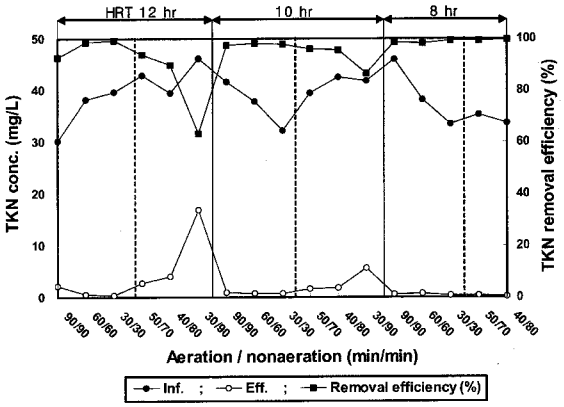

Fig. 6. TKN removal at various HRTs and aeration/nonaeration time ratios.

이와같이 부직포 여과막 생물반응조에서는 MBR에서와 같이 MLSS농도를 높게 유지함으로써 F/M비를 낮게 유지할 수 있어 유기물이 철저히 제거될 뿐만 아니라, 유기성분이 대부분인 MLSS도 철저히 제거될 수 있으므로 높은 유기물 제거효율을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

3.3. 질소의 제거

3.3.1. TKN의 제거와 질산화

Fig. 6은 유입수와 처리수의 TKN농도와 이들 값으로부터 계산된 TKN 제거효율을 나타낸 것으로, 제거된 TKN은 모두 질산화를 통하여 NO_x^--N(NO_2^--N, NO_3^--N)으로 산화되거나 미생물 합성에 쓰인 것으로 가정하여 TKN 제거효율을 나타내었다. Fig. 7에서 질산화효율은 유입수의 TKN에서 MLSS 증가량(유입수 내 비휘발성 부유물질은 제외)중 미생물의 분자식($C_5H_7O_2N$)으로부터 구한 미생물의 합성에 소비된 질소의 양을 뺀 값으로 나타내었다. 그리고 총 암모니아 중에서 중성의 pH에서 NH_3로 존재하는 양이 0.5% 미만으로 계산되므로 탈기되는 질소의 양은 무시하였다.

Fig. 6을 보면 MLSS 농도가 낮았던 12시간의 HRT에서 90분/90분의 포기/비포기 시간비를 제외한 모든 HRT에서 포기/비포기 시간비가 1인 경우에는 TKN 제거효율이 98% 이상의 높은 값을 나타내었다. 그러나 12시간 및 10시간의 HRT에서는 포기/비포기 시간비가 감소함에 따라 즉, 포기시간이 짧아짐에 따라 TKN 제거효율이 점점 악화되어, 30분/90분의 포기/비포기 시간비에서는 TKN 제거효율이 각각 63%와 86%를 나타내었다. 이는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 포기/비포기 시간비에 따른 질산화의 영향으로, 포기/비포기 시간비가 1인 경우에는 충분한 포기시간이 제공되어 반응조 내의 MLSS 농도가 낮았던 HRT 12시간에서의 90분/90분을 제외하고는 95% 이상의 질산화효율을 나타내었지만, 포기/비포기 시간비가 감소하면 충분한 포기시간이 제공되지 못하여 12시간 및 10시간의 HRT에서는 질산화효율이 각각 52% 및 78%로 감소하였다. 그러나 8시간의 HRT에서는 포기/비포기 시간비가 감소하여도 질산화효율은 악화되지 않았는데, 이는 유입수의 TKN농도가 평균 34 mg/L로

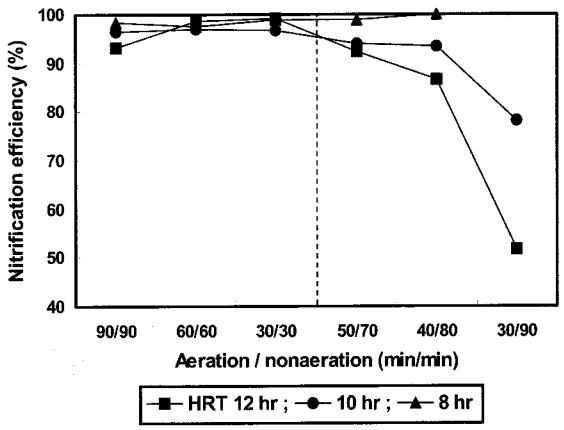

Fig. 7. Nitrification at various HRTs and aeration/nonaeration time ratios.

전체 실험기간 중의 평균 유입농도 40 mg/L에 비해 낮아 질산화가 영향을 받지 않았기 때문으로 추정된다. 30분/90분의 포기/비포기 시간비에서는 12시간 및 10시간의 HRT에서 각각 52% 및 78%로 질산화효율이 급격히 감소하였는데, 동일한 시간비에서 질산화효율이 다르게 나타난 것은 10시간의 HRT에서는 MLSS농도가 12시간의 HRT에서의 MLSS농도보다 높아 질산화를 일으키는 독립영양 질산화균이 많았을 뿐만 아니라 F/M비도 낮았기 때문으로 판단된다.

3.3.2. 탈질

HRT 및 포기/비포기 시간비의 변화에 따른 유출수의 NO_x^--N 농도와 탈질효율을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었는데, 탈질효율은 질산화된 질소의 양에서 유출수의 NO_x^--N의 양을 뺀 값을 탈질된 질소의 양으로 가정하여 구하였다. Fig. 8을 보면 포기/비포기 시간비가 1인 경우에는 모든 HRT에서 유출수의 NO_x^--N 농도가 대략 유입수의 TKN농도의 변화에 따라 변하였으며, 특히 10시간의 HRT에서는 유출수의 NO_x^--N 농도가 8 mg/L 이하로 낮게 나타났다. 또한 모든 HRT에서 포기/비포기 시간비를 감소시킴에 따라 유출수의 NO_x^--N 농도가 낮아지는 결과를 나타내었는데, 12시간 및 10시간의 HRT에서는 40분/80분과 30분

/90분의 포기/비포기 시간비에서 유출수의 NO_x^--N 농도가 모두 3 mg/L 이하로 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 포기/비포기 시간비가 감소함에 따라 반응조 내의 무산소 상태 기간이 증가하여 탈질효율이 증가한 결과로, Fig. 9에 나타낸 바와 같이 12시간 및 10시간의 HRT에서 포기/비포기 시간비가 40분/80분 및 30분/90분인 경우에는 85% 이상의 탈질효율을 나타내었다.

Fig. 9에 나타낸 바와 같이 모든 포기/비포기 시간비에서 12시간 및 8시간의 HRT에 비해 10시간의 HRT에서 탈질효율이 높게 나타났는데, 이는 10시간의 HRT에서의 MLSS 농도가 12시간의 HRT에서의 MLSS 농도보다 높게 유지되어 탈질균이 많았기 때문이며, MLSS농도가 약 12,000 mg/L로 10시간의 HRT와 동일하게 유지된 8시간의 HRT에서는 탈질에 필요한 체류시간이 감소하여 유출수 내의 NOx--N 농도가 증가하였기 때문으로 판단된다. 그리고 8시간의 HRT에서는 포기/비포기 시간비가 30분/30분 및 40분/80분인 경우에 다른 HRT에서의 동일한 포기/비포기 시간비에 비해 탈질효율이 많이 감소하였는데, 이는 Fig. 6에서 보는바와 같이 이 때의 유입수의 평균 TKN농도가 34 mg/L로 전체 실험기간 중의 TKN 평균 유입농도 40 mg/L보다 낮아 질산화된 질소의 양이 상대적으로 감소하였기 때문이다.

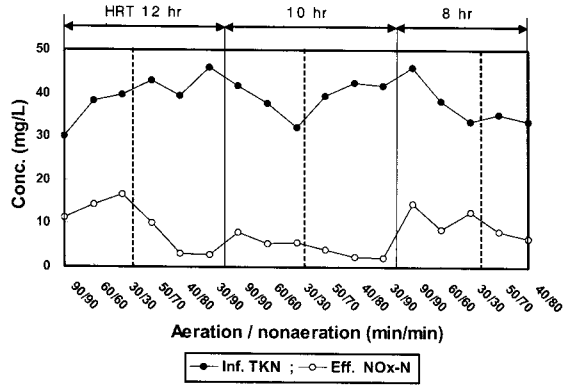

Fig. 8. Effluent NO_x^--N concentration at various HRTs and aeration/nonaeration time ratios.

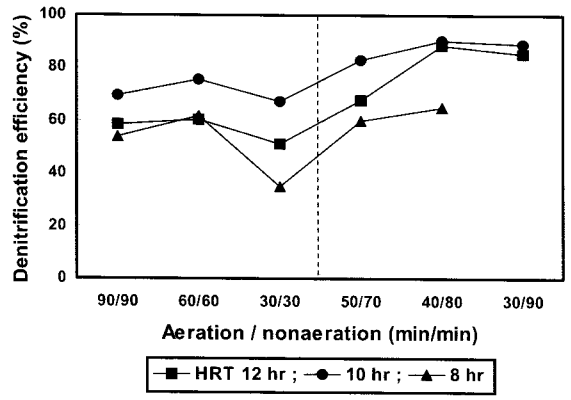

Fig. 9. Denitrification at various HRTs and aeration/nonaeration time ratios.

3.3.3. 총질소의 제거

HRT와 포기/비포기 시간비의 변화에 따른 총질소 제거효율의 변화를 나타낸 Fig. 10을 살펴보면 포기/비포기 시간비가 1인 경우 모든 HRT에서 60분/60분의 포기/비포기 시간비에서 총질소 제거효율이 가장 좋았으며, 12시간, 10시간 및 8시간의 HRT에서 총질소 제거효율은 각각 61.5%, 83.7% 및 74.8%로, 10시간의 HRT에서 가장 높았다. 이와 같이 포기/비포기 시간비가 1인 경우 모든 HRT에서 60분/60분의 포기/비포기 시간비에서 총질소 제거효율이 가장 좋은 이유는 90분/90분의 포기/비포기 시간비에서는 질산화를 위한 포기시간 및 탈질을 위한 비포기 시간이 필요이상으로 너무 길어 질산화-탈질반응의 반복횟수가 줄어들고, 주기시간이 가장 짧은 30분/30분의 포기/비포기 시간비에서는 포기 및 비포기 시간이 너무 짧아 질산화 및 탈질 반응에 필요한 시간이 충분히 제공되지 않아 질소 제거효율이 감소하였기 때문으로 판단된다. 따라서 본 실험에서 최적의 주기시간은 포기/비포기 시간비가 60분/60분인 2시간으로 판단된다.

가장 좋은 질소 제거효율을 보인 2시간의 주기시간에서 포기/비포기 시간비를 변화시킨 실험에서는 모든 HRT에서 포기/비포기 시간비가 40분/80분일 때 총질소 제거효율이 가장 좋은 것으로 나타났는데, 이때 각 HRT에서의 총질소 제거효율은 각각 82.6%, 90.1% 및 80.2%였다. 이는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 포기/비포기 시간비가 감소함에 따라 즉, 비포기 시간이 증가함에 따라 탈질효율이 증가한 데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 특히 10시간의 HRT에서는 모든 포기/비포기 시간비에서 총질소 제거효율이 80% 이상으로 다른 HRT에 비해 높은 값을 유지하였다.

결과적으로, 총질소 제거효율은 포기/비포기 시간비가 1인 경우에는 모든 HRT에서 포기/비포기 시간비가 60분/60분인 경우에 가장 좋았으며, 포기/비포기 시간비를 변화시킨 실험에서는 포기/비포기 시간비가 40분/80분인 경우에 가장 좋았다. 따라서 이러한 실험은 간헐포기되는 단일 반응조에서 최적의 질소 제거효율을 얻을 수 있는 포기/비포기 시간비를 찾을 수 있는 한 방법이 될 수 있을 것이다.

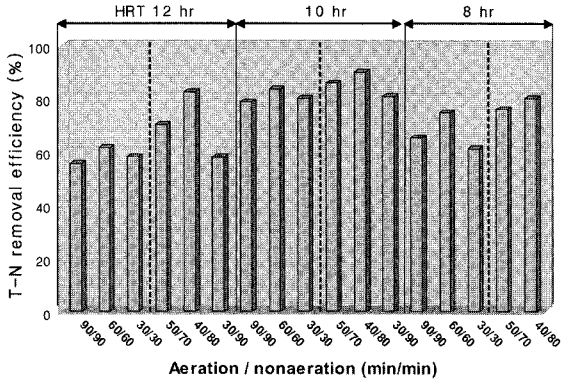

Fig. 10. T-N removal at various HRTs and aeration/nonaeration time ratios.

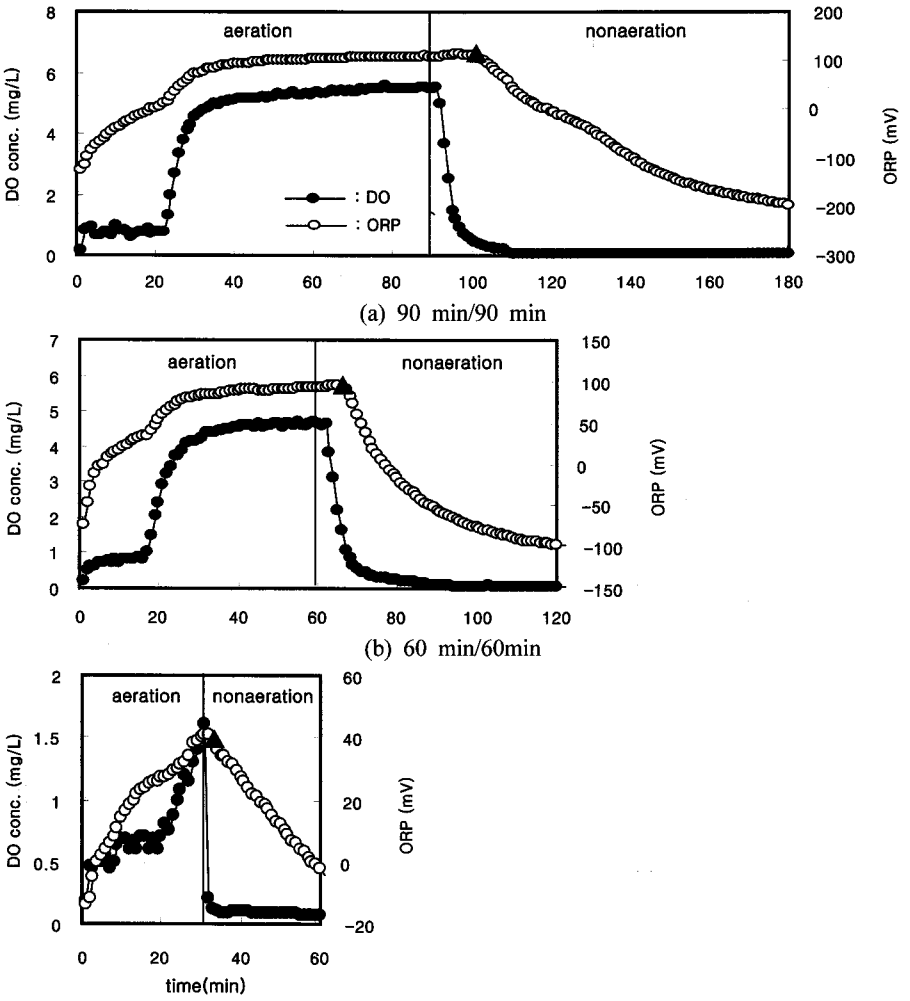

Fig. 11. DO concentration and ORP curves at various cycle times(HRT = 10 hrs).

3.4. 주기시간 및 포기/비포기 시간비의 변화에 따른 DO농도 및 ORP의 변화

생물학적 유기물 및 질소 제거에서는 유기물이 CO_2와 H_2O로 분해되면서 에너지를 생성하는 산화반응과 NO_x^--N가 전자수용체로 작용하여 N_2가스로 변하는 환원반응이 동시에 진행되며, 본 공법에서는 이러한 산화-환원반응이 동일한 반응조 내에서 포기/비포기 조건의 변화에 따라 일어나므로 산화-환원전위와 DO농도의 변화를 측정하면 탈질의 시점과 종점을 알 수 있다.[19]

Fig. 11은 10시간의 HRT에서 주기시간을 3시간, 2시간 및 1시간으로 변화시켰을 때의 DO농도 및 ORP의 변화를 1분 간격으로 측정하여 도시한 것으로, 예상한 바와 같이 DO농도와 ORP가 포기시에는 증가하고 비포기시에는 감소하는 경향을 나타내어 ORP가 DO농도의 변화에 따라 비슷한 양상으로 변하는 것을 알 수 있다.

질소는 질산화-탈질을 한 주기로 하여 제거되므로 최대의 질소 제거효율을 얻을 수 있는 조건은 질산화에 충분한 포기시간과 탈질에 충분한 비포기시간이 제공될 때이며, 이러한 조건 하에서 HRT당 주기시간의 반복횟수가 많을수록 질산화-탈질의 횟수가 증가하여 질소 제거효율은 증가하게 된다. 주기시간만을 변화시킨 실험에서는 2시간의 주기시간에서 총질소 제거효율이 가장 높은 값을 보였는데, 이는 Fig. 11에서 보는 바와 같이 3시간의 주기시간에서는 질산화 및 탈질에 충분한 시간이 제공되지만 2시간과 1시간의 주기시간에 비해 질산화-탈질의 반복횟수가 적기 때문에, 그리고 1시간의 주기시간에서는 동일한 HRT에서 질산화-탈질의 반복횟수는 가장 많으나 질산화-탈질에 충분한 시간을 제공하지 못하기 때문이다. 본 연구에서는 질산화-탈질 반응에 충분한 시간을 제공함으로써 최대 질소 제거효율을 얻을 수 있는 주기시간이 2시간인 것으로 나타났다. ORP곡선상의 삼각점(▲)은 탈질이 시작되는 변곡점을 표시하는데, 모든 주기시간에서 비포기가 시작됨에 따라 DO농도가 감소하면서 탈질이 시작되는 변곡점이 나타났지만 탈질이 완료되는 변곡점은 나타나지 않았다. 이는 100% 탈질에 필요한 시간이나 전자공여체가 충분히 제공되지 않았기 때문이다.

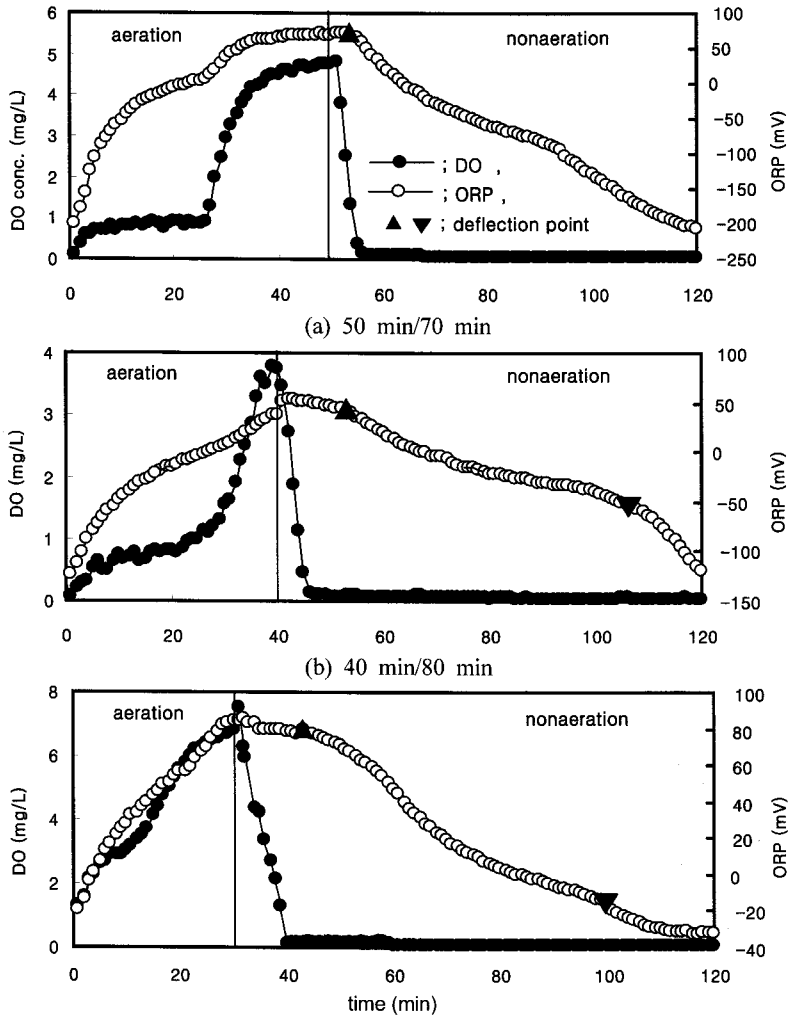

Fig. 12. DO concentration and ORP curves at various aeration/ nonaeration time ratios(HRT = 10 hr, cycle time = 2 hr).

Fig. 12는 10시간의 HRT에서 2시간의 주기시간으로 포기/비포기 시간비를 변화시킨 실험에서의 DO농도 및 ORP의 변화를 도시한 것으로, 모든 포기/비포기 시간비에서 비포기기간이 시작됨에 따라 DO농도가 감소하면서 탈질이 시작되는 변곡점(▲으로 표시)이 나타났으며, 40분/80분 및 30분/90분의 포기/비포기 시간비에서는 탈질이 완료되어 반응조 내액의 NOx--N 농도가 0이 되는 변곡점(▼으로 표시)도 나타났다. 이는 비포기시간이 증가함에 따라 탈질에 필요한 무산소 기간이 충분히 제공되었기 때문이며, Fig. 9에서 비포기시간이 증가함에 따라 탈질효율이 증가하여 40분/80분 및 30분/90분의 포기/비포기 시간비에서 동일하게 높은 탈질효율을 보이는 이유이다. 그러나 30분/90분의 포기/비포기 시간비에서는 질산화에 필요한 호기기간이 충분히 제공되지 못하여 Fig. 7에 나타난 바와 같이 질산화효율이 악화되었다. 이와 같은 결과는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 충분한 질산화와 탈질을 통해 질소를 제거할 수 있는 최적의 포기/비포기 시간비가 모든 HRT에서 40분/80분임을 잘 뒷받침하는 것이다.

4. 결 론

부직포 여과막 생물반응조에 하수를 연속적으로 주입하면서 HRT, 주기시간 및 포기/비포기 시간비를 변화시키며 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 실험기간 중 BOD 제거효율은 항상 95% 이상으로 그리고 SS 제거효율은 97% 이상으로 유지되었다. 부직포 자체와 부직포 내부 및 표면에 형성된 생물막이 여과막으로 작용함으로써 처리수의 SS농도는 1.2 mg/L 이하로 유지되었다.

2) 포기/비포기 시간비를 1로 유지하면서 주기시간을 3, 2 및 1시간으로 변화시킨 실험에서는 총질소 제거효율이 모든 HRT에서 2시간의 주기시간에서 가장 좋았으며, 그 중에서도 HRT가 10시간일 때 2시간의 주기시간에서 83.7 %로 가장 높았다.

3) 2시간의 주기시간에서 포기/비포기 시간비를 변화시킨 실험에서는 모든 HRT에서 포기/비포기 시간비가 40분/80

분인 경우에 가장 좋은 총질소 제거효율을 나타내었으며, 그 중에서도 10시간의 HRT에서 90.1%로 가장 높았다.

4) DO, ORP 및 NO_x^--N 농도의 변화를 측정하여 비교한 결과 질산화와 탈질반응에 따라 증감하는 ORP가 반응조 내의 미생물의 반응상태를 잘 나타냄을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 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).
2. Chemchaisri, C., Yamamoto, K., and Vigneswaran, S., "Household membrane bioreactor in domestic wastewater treatment," *Water Sci. Technol.*, **27**(1), 171~178(1993).
3. Chaize, S. and Huyard, A., "Membrane bioreactor on domestic wastewater treatment : Sludge production and modeling approach," *Water Sci. Technol.*, **23**(7-9), 223~229(1998).
4. 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).
5. U.S. EPA., *Wastewater Technology Fact Sheet-Sequencing Batch Reactors*, Washington, D.C.(1999).
6. Hiroyuki, A., Kenichi, K., Katsuto, I., Tetsuya, K., and Youichi, A., "Intermittent aeration for nitrogen removal in small oxidation ditches," *Water Sci. Technol.*, **22**(3-4), 131~138(1990).
7. 전병희, 김도환, 최은희, 배현, 김성신, 김창원, "DO와 ORP를 이용한 축산폐수처리 SBR운전 제어," 한국물환경학회지, **18**(5), 545~551(2002).
8. Li, B. and Bishop, P., "Oxidation-reduction potential(ORP) regulation of nutrient removal in activated sludge wastewater treatmnet plants," *Water Sci. Technol.*, **46**(1-2), 35~39(2002).
9. Tomlins, Z., Thomas, M., Keller, J., Audic, J.-M., and Urbain, V., "Nitrogen removal in a SBR using the OGAR process control system," *Water Sci. Technol.*, **46**(4-5), 125~130(2002).
10. Peng, Y. Z., Gao, J. F., Wang, S. Y., and Sui, M. H., "Use pH and ORP as fuzzy control parameters of denitrification in SBR process," *Water Sci. Technol.*, **46**(4-5), 131~137(2002).
11. Zipper, T., Fleischmann, N., and Haberl, R., "Development of a new system for control and optimization of small wastewater treatment plants using oxidation-reduction potential," *Water Sci. Technol.*, **38**(3), 307~314(1998).
12. Plisson-Saune, S., Capdeville, B., Mauret, M., Deguin, A., and Baptiste, P., "Real-time control of nitrogen removal using three ORP bending-points: Signification, control strategy and results," *Water Sci. Technol.*, **33**(1), 275~280(1996).
13. Paul, E., Plisson-Saune, S., Mauret, M., and Cantet, J., "Process state evaluation of alternating oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO," *Water Sci. Technol.*, **38**(3), 299~306(1998).
14. 조광명, "여과막 활성슬러지공법에 의한 유기성 폐수의 처리," 대한토목학회논문집, **28**(6), 119~133(1980).
15. 임상호, 배민수, 조광명, "부직포 여과막 생물반응조를 이용한 하수의 처리," 한국물환경학회지, **19**(1), 99~107(2003).
16. 황도연, 강복춘, 조광명, "간헐 폭기식 부직포 여과막 생물반응조에서 폭기/비폭기 시간비가 하수의 유기물 및 질소제거에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **25**(2), 258~265(2003).
17. APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., Washington D.C., USA(1998).
18. 환경부 고시 제 96-32호, 수질환경오염공정시험법(1996).
19. Fuerhacker, M., Bauer, H., Ellinger, R., Sree, U., Schmid, H., Zibuschka, F., and Puxbaum, H., "Approach for a novel control strategy for simultaneous nitrification/denitrification in activated sludge reactors," *Water Res.*, **34**(9), 2499~2506(2000).