

침지식 중공사막을 결합한 Dynamic state 하수고도처리공정(KSMBR process)의 개발 및 현장적용평가

김지연 · 서인석[†] · 김홍석 · 김연권 · 김병군 · 최창규 · 안효원 · 서원석^{*} · 장문석^{**}

한국수자원공사 수자원연구원 상하수도연구소

^{*}쌍용건설(주)

^{**}(주)케이엠에스

Development and Field Application of the Advanced Wastewater Treatment process (KSMBR) by Hollow Fiber Submerged Membrane

Ji-yeon Kim · In-seok Seo[†] · Hong-suck Kim · Youn-kwon Kim ·
Byung-goon Kim · Chang-gyu Choi · Hyo-won Ahn ·
Wan-seok Seo^{*} · Moon-seog Jang^{**}

Water and Wastewater Research Center, KIWE, KOWACO

^{*}Ssangyong engineering & construction Co., Ltd.

^{**}Korea Membrane Separation Co., Ltd.

(Received 12 December 2005, Accepted 8 February 2006)

Abstract

KSMBR process is dynamic state advanced wastewater treatment applied with Trisectional Aeration (TSA) mode combined with membrane. TSA was remodeled conventional intermittent aeration which was operated nonaeration-aeration. TSA operates nonaeration (N₁) - aeration (A) - nonaeration (N₂) in Trisectional Aeration Reactor (TAR). Organics of influent could be nearly consumed to denitrification without influence by remained DO in TAR and it could be operated about sludge return ratio of 1Q (influent base). The purpose of this study was to apply KSMBR to the full-scale plant and to evaluate efficiency of nitrogen and phosphorus removal and TSA operation. The result of this study, average CODcr/T-N and CODcr/T-P ratio were 7.8 and 59.6, respectively. BOD, TCODcr, SS, T-N, T-P, E-coli removal efficiency were 98.4, 95.2, 73.0, 69.6, 99.95 %, respectively. KSMBR obtained high removal efficiencies of C, N and P when it applied full-scale plant.

keywords : Intermittent Aeration, Membrane Bio-Reactor (MBR), Small wastewater Treatment Plant (STP), Trisectional Aeration (TSA)

1. 서론

우리나라에서 2003년 말 가동중인 마을하수처리시설은 878개소로서 그 중 2.3%의 처리시설은 멤브레인을 이용하여 하수를 처리하고 있다. 이 시설의 처리용량은 30~100 m³/day로 주로 중·소규모 처리시설에 적용되어 운영 중에 있으며 하수종말처리시설에는 아직 적용된 실적이 없다(환경부, 2004). 멤브레인을 이용하여 처리수를 배출하는 하수고도처리시설은 대장균과 고형물을 완벽하게 분리하여 처리수를 배출하므로 여과나 소독 등의 추가적인 설비가 필요치 않고, 자동화 설비로 인해 무인운영관리가 용이하며, 멤브레인의 성능과 처리시설의 운영방법 축적으로 점차 대형처리시설에도 적용하는 추세이다.

간헐포기법(intermittent aeration)은 한 개 이상의 반응조

를 직렬로 배치하여 공기공급을 On/Off 시켜 운영하는 고도처리 방법으로, 최적 운전조건(포기/비포기 비율)을 찾기 위한 연구가 많이 수행되어 왔다(고 등, 2003; Kang et al., 2003; Hasar et al., 2002). 그러나 처리효율도 우수하고 운영관리가 쉬우며 에너지 절감효과도 있지만(이, 1998), C/N 비가 낮은 하수에 적용하면 포기 후 비포기로 전환 시 실제 무산소 조건이 되기 위해 일정 시간이 소모되며 실질적인 무산소 조건의 체류시간이 감소될 뿐만 아니라 탈질이나 인 방출에 이용되어야 할 유기물이 남아있는 용존산소에 의해 소비되어 탈질이 완벽하게 수행되지 않는 단점이 있다(이 등, 1997). 이 단점을 극복하기 위해 한 반응조에서 질산화 및 탈질을 수행하며, 유입수를 비포기 기간에 주입하여 유기물 손실을 줄일 수 있는 많은 연구가 이루어지고 있으며, 현장에도 많이 적용되는 실정이다(박 등, 1999; 허, 2000).

본 연구에서는 이러한 간헐포기법의 단점을 보완한 dynamic state 공정에 멤브레인을 결합한 KSMBR 공정을

[†] To whom correspondence should be addressed.
seois@kowaco.or.kr

개발하였고, 간헐포기법의 포기시간(A)을 비포기(Nonaeration, N₁)-포기(Aeration, A)-비포기(Nonaeration₂, N₂)로 삼분할하여 포기구간에 공급된 용존산소가 다음 cycle의 비포기 구간에 영향을 주지 않도록 개량한 삼분할포기법을 적용하였다. 본 연구에서 개발한 공정을 접촉포기법으로 운영되고 있는 마을하수처리시설에 적용하여 그 효율성을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 실험방법 및 장치

개발공정은 혐기조(Anaerobic, An), 두 개의 교대유입 삼분할반응조(Trisectional Aeration Reactors, TARs), 침지식 막분리호기조(Submerged Membrane Aerobic Reactor, SMAR) 및 용존산소저감조(Oxygen Exhausting Reactor, OER)로 구성되었으며, 유입수는 침사 및 유량조정조에 일정기간 저장된 후 드럼스크린을 거쳐 혐기조로 24시간 유입된다. 혐기조의 슬러지는 흐름변경장치를 통해 60분 간격으로 두 개의 삼분할반응조로 유입된다. 60분 동안 슬러지가 유입되는 비포기(N_F), 슬러지가 유입되지 않는 비포기(N₁, 20분)-포기(A, 20분)-비포기(N₂, 20분)의 1 cycle은 두 개의 반응조에서 교대로 수행하게 된다. 슬러지가 유입되는 비포기(N_F)에는, 반응조의 NO₃-N을 혐기조에서 완전히 소모되지 않은 유기물을 이용하여 탈질시키고, 포기(A)에는 질산화 반응을 유도한다. 마지막 비포기(N₂)는 반응조내 용존산소를 완전히 고갈시키는 역할을 하여, 다음 cycle이 시작되면 완전한 무산소 조건을 만들어 탈질효율을 높일 수 있었다. 막분리 호기조는 삼분할반응조에서 미 산화된 NH₄⁺-N과 유기물을 산화시키고 처리수는 중공사막을 침지시켜 처리하였다. 막분리 호기조에는 멤브레인 파울링을 방지하기 위해 DO를 5 mg/L 내외로 유지하였으며, 호기조에서 혐기조로 반송되

Table 1. Operating conditions for KSMBR

Items	Values(Average)
Total design HRT (hr)	6
SRT (day)	48
MLSS (mg/L)	4,479~9,220 (7,443)
BOD loading rate (kgBOD/m ³ /d)	0.11~1.47 (0.35)
F/M ratio (kgBOD/SSm ³ /d)	0.01~0.18 (0.05)
CODcr/T-N ratio	3.6~16.5 (7.8)
CODcr/T-P ratio	15.8~105.5 (59.6)
Air flow rate (m ³ /min)	5.2~8.0 (7.2)

는 슬러지 내의 DO를 저감시키기 위해 별도로 용존산소저감조를 설치하였으며, 반송량은 유입수 대비 1Q로 운영하였다. 삼분할포기조의 운영방법은 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구에 사용된 중공사막은 (주)케이엠에스사의 멤브레인을 사용하였으며, 폴리에틸렌(PE) 재질의 기공크기 0.23 μm인 중공사막을 사용하였다. 막의 단면적은 100 m²/frame으로 총 6 프레임을 침지하였고 멤브레인 모듈 하단에 산기관을 설치하여 포기공기만으로 세정(air scrubbing)을 하였으며, 처리수의 흡입은 7분 가동, 3분 정지로 운영하였다. 멤브레인의 차압이 0.729 kg/cm² 이상으로 상승하면 계외 세정을 실시하여야 하나, 본 연구에서는 차압이 0.509 kg/cm²까지 올라간 시점에서 별도로 설치된 세정조에 0.3 wt% Ca(OCl)₂를 이용하여 약 2시간 침지시켜 세정을 하였다. 현재 상용화되어 있는 멤브레인은 2~3개월에 1회 정도의 계외 세정이 필요하지만 본 연구에서는 6개월 이상 운영 후 세정하여 다른 멤브레인에 비해 계외 세정주기가 길고 유지관리가 용이하였다(Kimura et al., 2000).

2.2. 유입수 특성 및 분석방법

본 연구는 2004년 10월부터 2005년 10월까지 약 13개월 동안 충북 G군 S 마을하수처리시설에서 운영하였으며, 유

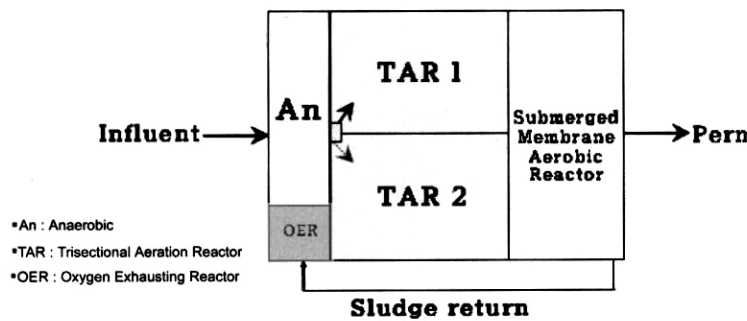


Fig. 1. Schematic diagram of KSMBR.

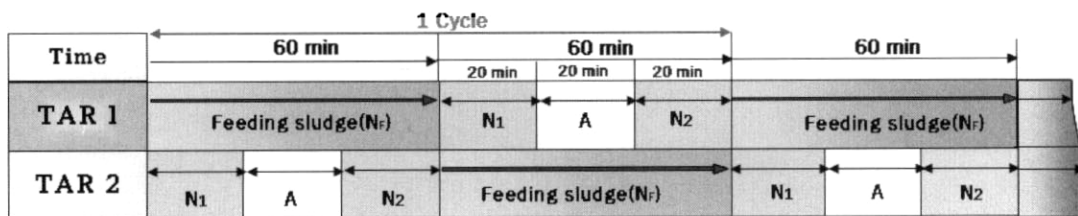


Fig. 2. Operating mode in TARs.

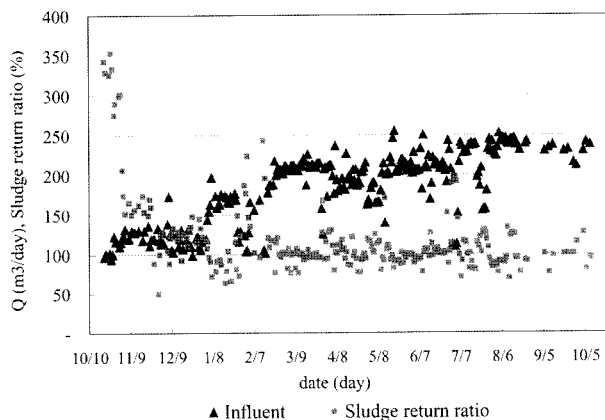
Table 2. Characteristics of domestic wastewater

Item	BOD	TCODcr	SCODcr	T-N	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	T-P	PO ₄ ³⁻ -P	SS	Unit : mg/L
											E-Coli (cell/mL)
Range	31.6~331.0	48.0~328.0	12.0~316.0	8.4~70.0	6.8~33.8	0.0~4.2	0.0~6.2	1.5~14.2	1.0~5.5	7.0~556.0	1,170~710,000
Average	99.4	193.6	106.2	26.0	21.2	1.9	1.3	3.4	2.2	94.6	59,174

입수는 분류식 및 합류식 관거에서 들어오는 마을하수로서, 94~255.6 m³/day로 유입되었다. 유입수의 평균 CODcr/T-N 비는 7.8, CODcr/T-P 비는 59.6로 유입되었으며, BOD 부하는 0.35 kgBOD/m³/d이었다. 운영기간동안 유입수 수질은 table 2에 나타내었다.

수온은 운영기간동안 5.4~25.0°C였으며, 동절기(12~2월)는 5.4~13.8°C (평균 8.8°C), 하절기(3~11월)는 6.5~25.0°C (평균 16.7°C)로 운영되었다. KSMBR은 programming logic controller(PLC)를 이용하여 모든 운영사항을 제어하였고 삼분할반응조에 DO, ORP meter를 설치하였다. On-line 모니터링 장치를 이용해 현장뿐만 아니라 D시에 위치한 연구소에서도 모든 운영사항을 모니터링 및 제어할 수 있도록 하였으며, 유량, 차압, 전력량과 DO 및 ORP를 모니터링 하였다.

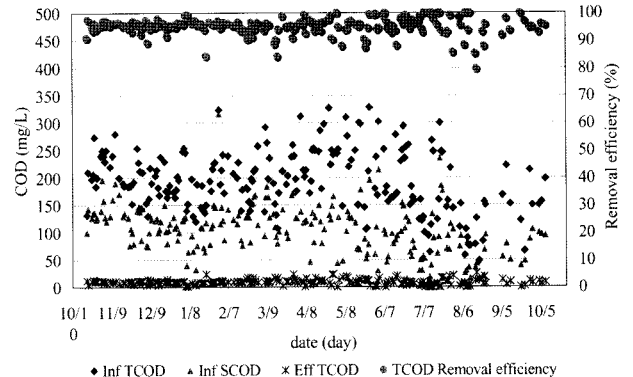
각 반응조의 DO, pH 및 ORP는 각각 YSI model 58, DKK TOA 사의 RM20P, Orion 230A+을 이용하였고, 반응조의 MLSS는 Central KAGAKU사의 ML-53으로 측정하였으며, 기타 모든 수질분석은 *Standard Methods*(APHA, 1999) 및 공정시험법에 준하여 측정하였다.

**Fig. 3.** Flow of influent and sludge recycle ratio.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거특성

운영기간동안 유입수의 TCODcr은 48.0~328.0 mg/L 범위에서 유입되었으며, 평균 193.6 mg/L였다. 유입수의 CODcr 용적부하는 0.21~1.45 kgCODcr/m³/d, 평균 0.66 kgCODcr/m³/d로 유입되었다. 처리수 TCODcr은 9.0 mg/L, BOD는 1.3 mg/L로 배출되었으며, 처리효율은 95.2%, 98.4%였다(Fig. 4). 0.23 μm의 멤브레인을 통한 고품질 분리수 처리수의 SS는 거의 검출되지 않았다. 대부분의 유기물은 질소 및 인 제거에 사용되었으며 멤브레인으로 처리

**Fig. 4.** Variation of influent, effluent CODcr concentration and removal efficiency.

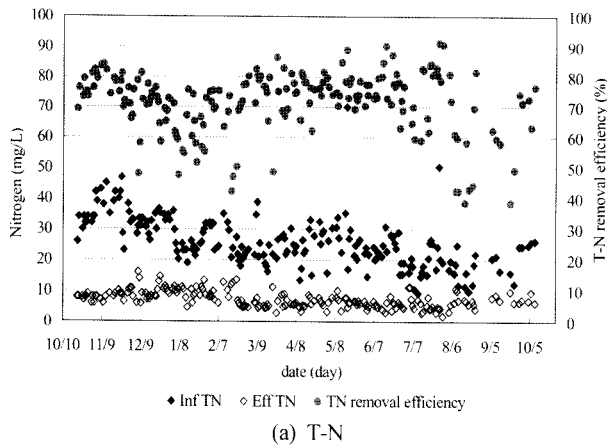
수를 배출하였기 때문에 운영기간동안 효율적인 유기물 제거가 이루어졌다.

3.2. 질소, 인 제거특성

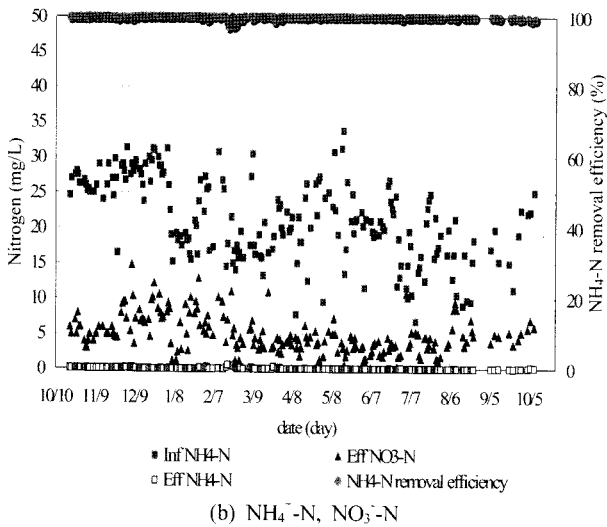
운영기간동안 유입수의 CODcr/T-N비는 3.6~16.5 (평균 7.8)로 유입되었으며, 유입수 T-N은 26.0 mg/L, NH₄⁺-N은 21.2 mg/L로 유입되었다. 동절기에 유입수 수온은 최저 5.4°C까지 떨어졌으나 동절기에도 완벽하게 질산화가 일어나 처리수 NH₄⁺-N은 0.07 mg/L, 제거효율 99.7%였다. 처리수 평균 수질은 T-N 7.2 mg/L, NH₄⁺-N 0.04 mg/L, NO₃⁻-N 5.01 mg/L이었으며, 제거효율은 T-N 73.0%, NH₄⁺-N 99.8%였다(Fig. 5). 온도에 따른 T-N 제거효율은 동절기 68.4%, 춘하절기 75.9%로 질소제거는 온도의 큰 영향이 없었으며 이는 반응조 내 높은 미생물 농도로 인해 온도의 영향을 받지 않고 동절기에도 완벽하게 질산화가 이루어졌으며, 삼분할포기법의 적용으로 용존산소에 의한 저해작용을 최소화하여 안정적인 질소제거를 할 수 있었다(Fig. 6). T-N 제거속도는 동절기 18.7 mgN/gVSS/d, 춘하절기 15.9 mgN/gVSS/d로 동절기에 높았으며 이는 유입수 BOD가 동절기에 다소 높게 유입되었기 때문이다.

운영기간동안 유입수의 T-P는 1.5~14.2 mg/L, 평균 3.4 mg/L로 유입되었다. 처리수의 T-P는 평균 1.0 mg/L였으며, 처리효율은 69.6%였다(Fig. 7). 동절기 처리수 T-P 농도는 1.12 mg/L였으며, 춘하절기는 0.97 mg/L로 동절기에 비해 인 제거효율이 더 높았다. T-P 제거속도는 동절기 2.44 mgP/gVSS/d, 춘하절기 2.46 mgP/gVSS/d로 온도에 따른 큰 차이는 없었으며 질소제거와 달리 인제거 속도는 온도에 큰 영향이 없었다.

인 제거에 있어서 혐기조 및 삼분할포기조의 무산소 조건에서 인 방출 기작이 뚜렷하게 나타나지 않았는데 이는 각 반응조에서 NO₃⁻-N이 존재하여 P-release가 저해받은



(a) T-N



(b) NH_4^+-N , NO_3^--N

Fig. 5. Variation of influent and effluent T-N, NH_4^+-N , NO_3^--N concentration and removal efficiency.

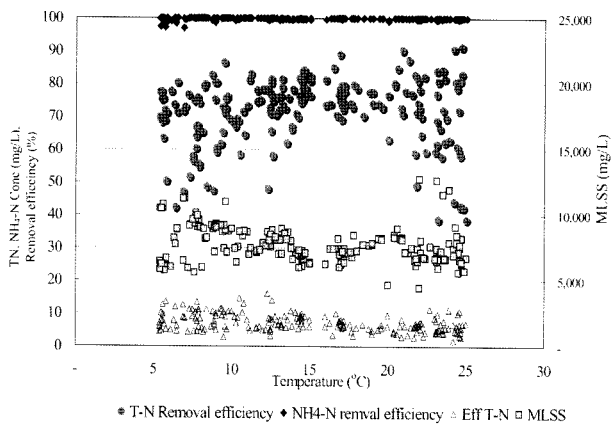


Fig. 6. Relation between T-N, NH_4^+-N , MLSS concentration and removal efficiency.

것으로 판단되며, 혐기조의 짧은 체류시간으로 완벽하게 탈질되지 않아 완전한 혐기조건이 이루어지지 않았고 유입수 중의 쉽게분해가능한 유기물(RBDCOD)이 탈질 및 탈인에 이용되기에 충분하지 않았기 때문이다. 따라서 인 제거는 뚜렷한 EBPR(Enhanced Biological Phosphorus Removal)에 의한 인 제거보다는 미생물 합성에 의한 인 제거 및 SRT 조절에 따른 슬러지 폐기에 의해 인이 제거된 것으로 판단

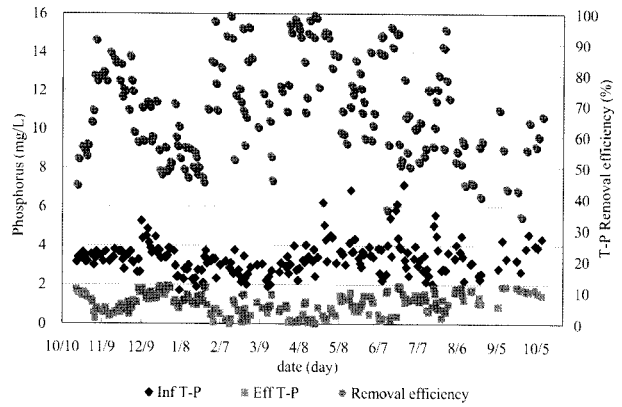


Fig. 7. Variation of influent, effluent T-P concentration and removal efficiency.

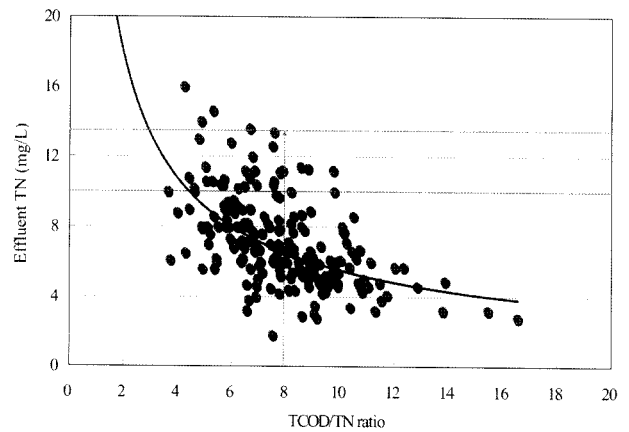


Fig. 8. Relation between the $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{T-N}$ ratio and Effluent T-N concentration.

된다.

운영기간동안 유입수의 평균 $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{T-N}$ 비는 7.8이었으며, 이때 처리수 T-N 농도는 11.4 mg/L로 배출되었다. $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{T-N}$ 비가 9.8 이상에서 처리수의 T-N은 10 mg/L 이하로 배출되는 것으로 나타났다(Fig. 8). $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{T-P}$ 비는 59.6였으며 질소제거와는 달리 인 제거에 있어서 유입수의 유기물농도의 영향을 크게 받지 않은 것으로 나타났다. $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{T-P}$ 비 34 이하에서는 처리수 T-P는 1 mg/L이하로 는 처리되지 않았다(Fig. 9).

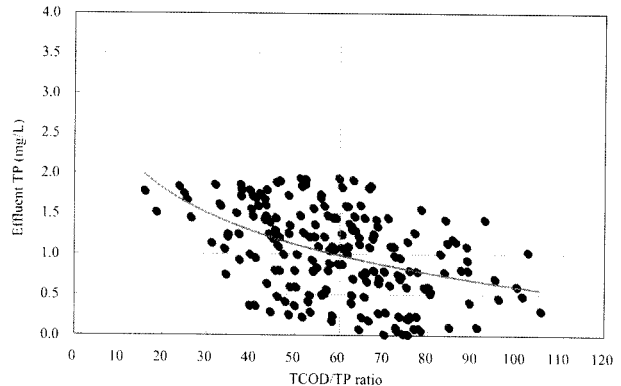


Fig. 9. Relation between the $\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{T-P}$ ratio and Effluent T-P concentration.

Table 3. Summarise of the water quality

Unit : mg/L

Items	Influent (mg/L)		Effluent (mg/L)		Removal efficiency(%)
	Average	Range	Average	Range	
BOD	99.4	31.6 ~ 331.0	1.4	0.4 ~ 3.3	98.4
TCODcr	193.6	48.0 ~ 328.0	9.0	0 ~ 25.6	95.2
SCODcr	106.2	12.0 ~ 316.0	8.3	0 ~ 25.6	91.3
T-N	26.0	8.4 ~ 70.0	7.2	1.8 ~ 16	73.0
NH ₄ ⁺ -N	21.2	6.8 ~ 33.8	0.04	0 ~ 0.55	99.8
NO ₃ ⁻ -N	1.3	0.0 ~ 4.2	5.01	0.1 ~ 14.8	-
T-P	3.4	1.5 ~ 14.2	1.0	0.0 ~ 1.9	69.6
PO ₄ ³⁻ -P	2.2	1.0 ~ 5.5	0.9	0.0 ~ 1.9	59.3
SS	94.6	7.0 ~ 556.0	0.3	0 ~ 2	99.2
E-Coli(cell/mL)	59,174	1,180 ~ 710,000	22	ND ~ 96	99.95

대부분 BNR 공정에서는 질소제거효율을 높이기 위해 슬러지 내부반송을 2~3Q 정도로 운영하며, 슬러지 반송율을 유입수 대비 3Q로 운영하여 최대 65%의 탈질화 효율을 얻은 운영결과(박 등, 2002)와 달리 본 연구에서는 유입수 대비 1Q 수준의 슬러지 반송에서도 73%의 질소제거효율을 얻을 수 있었다. 이는 삼분할포기법의 운영으로 한 반응조에서 질산화와 탈질을 수행하여 내부반송 효과를 대신하였으며, 운영초기 슬러지 반송을 3Q로 운영했을 때 질소제거효율은 80% 이상으로 나타났다. 운영기간동안 유입수 및 처리수의 농도 및 제거효율을 Table 3에 나타내었다.

향후 혐기조의 운영은 P-release를 위한 시간을 충분히 확보하고, 유입수의 RBDCOD 농도가 더 높아지면 혐기조에서 NO₃⁻-N의 방해없이 P-release가 잘 일어난다면 호기조의 체류시간이 충분하기 때문에 인 제거 효율이 더 높아질 것으로 판단된다.

3.3. 삼분할포기조의 운영

비포기-포기로 운영되는 간헐포기공정은 포기가 끝난 후 10분 이내에 용존산소가 소멸되므로(이 등, 1997; 허 등, 2001), 포기 종료 후 다음 cycle에서 유입수가 주입되는 공정은 용존산소를 저감시키기 위한 비포기 기간이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 이러한 간헐포기법의 단점을 보완하여 삼분할포기법을 적용하였으며 포기기간에 용존산소의 농도를 2~3 mg/L로 운영하여, 포기 종료 10분 후 용존산소농도가 0 mg/L에 도달하였다(Fig. 10). 따라서 다음 cycle이 시작되면 반응조 내 DO가 존재하지 않아 실제 탈질을 위한 시간이 모두 확보되므로 탈질 효율을 높일 수 있다.

3.4. 멤브레인 운영

운영기간동안 유량계에 부착되어 있는 압력계를 이용하여 압력을 측정한 결과, 0.237~0.559 kgf/cm²까지 증가하였으며 평균 0.445 kgf/cm²로 나타났다. Flux는 평균 19.9 LMH(L/m²/hr)로 운영되었다(Fig. 11). 운영초기 Trans Membrane Pressure(TMP)는 0.013 kgf/cm²에서 0.35 kgf/cm²로 증가하였으나, 계외 약품세정으로 0.14 kgf/cm²까지 감소하

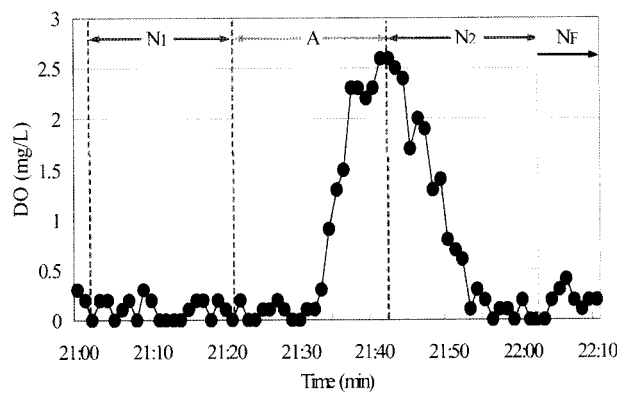
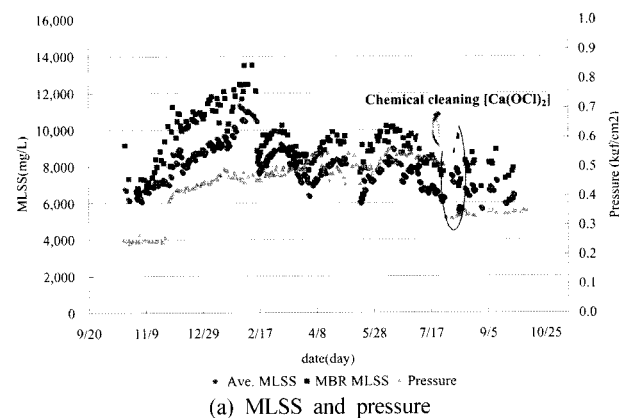
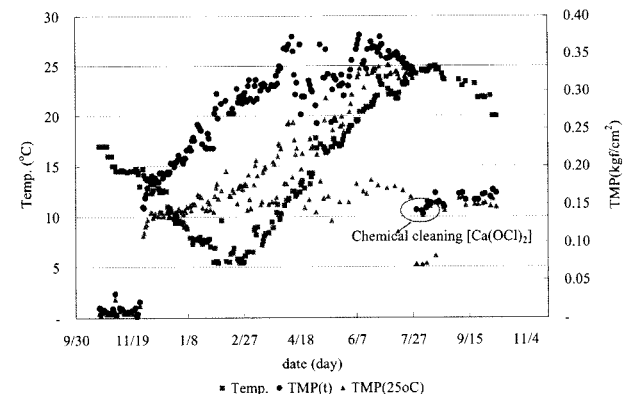


Fig. 10. DO profile in the TAR.



(a) MLSS and pressure



(b) TMP and temperature

Fig. 11. Variation of MLSS, pressure, temperature and TMP.

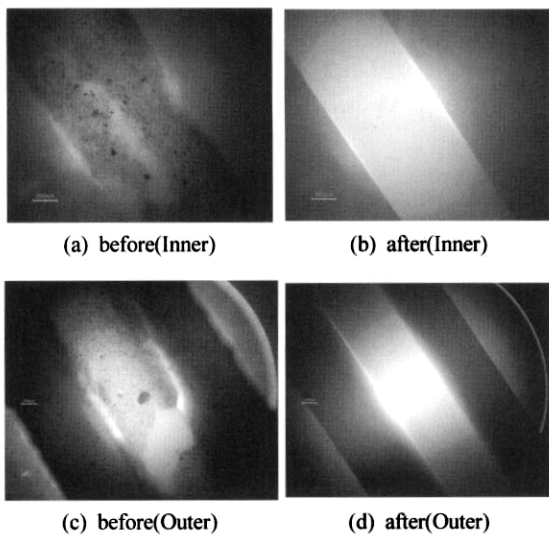


Fig. 12. The surface of the membrane before and after cleaning ($\times 40$).

였으며, 이는 약품($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) 세정으로 막 파울링이 제거됨을 알 수 있다(Fig. 12). 운영에 사용된 멤브레인은 호기조의 포기공기만으로 계내 유지세정(air scrubbing)을 하여 6개월 이상 계외 약품세정 없이 운영이 가능하였다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 간헐포기법의 단점을 보완한 삼분할포기법을 개발하여 멤브레인을 결합한 dynamic state 하수고도처리공정에 도입하여 현재 운영중인 G 군 마을하수처리시설에 약 13개월 운영한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실제 마을하수처리시설에 적용한 결과 유입수 농도 변화가 크게 나타났으나, 안정적인 처리효율을 얻을 수 있었다. TCODcr, T-N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, T-P, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 제거 효율은 95.2, 73.0, 99.8, 69.6, 59.3%로 나타났으며 온도의 영향을 크게 받지 않았다.
- 2) CODcr/T-N 비는 평균 7.8로 유입되었으며, 평균 이상으로 유입되면 처리수 T-N 농도는 11.4 mg/L 이하로 배출되었다. T-N 제거속도는 동절기 18.7 mgN/gVSS/d, 춘하절기 15.9 mgN/gVSS/d로 나타나 동절기에 다소 높게 나타났다.
- 3) CODcr/T-P 비는 평균 59.6으로 유입되었으며 인 제거에 있어서 유입수의 유기물 농도 및 온도의 영향을 크게 받지 않았다. 혐기조 및 삼분할포기조에서 인 방출 기작이 뚜렷하게 나타나지 않았는데 인 제거 기작은 생물학적 인제거보다는 미생물 합성에 의한 인제거 및 각 반응조에서 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 존재에 따른 P-release 저해현상에 의한 것으로 판단된다.
- 4) 삼분할포기조의 운영으로 유입수가 주입되는 비포기기간(N_F)에 용존산소에 의한 유기물 손실을 최소화할 수 있었으며, 1Q 수준의 슬러지 반송에도 73% 질소제거효

율을 얻을 수 있었다.

- 5) 19.9 LMH의 flux로 운영한 결과, 포기공기만을 이용한 air scrubbing 만으로도 충분히 fouling을 제어할 수 있었으며, 계외 약품세정 없이 6개월 이상 멤브레인의 사용이 가능하였다.
- 6) 질소·인 제거 하수고도처리 공정에 멤브레인을 결합한 KSMBR 공정을 실제 마을하수처리시설에 운영한 결과, 동절기에도 수질기준에 적합한 처리수를 배출하였으며, 운영관리가 용이하여 중·소규모 처리시설에 적합한 공정으로 판단된다.

참고문헌

고현웅, 최성문, 성낙창, 침출수 처리를 위한 침지형 부직포여과 활성슬러지법에서 최적 운전인자 도출에 관한 연구, *대한환경공학회지*, **25**(3), pp. 295-300 (2003).

박승국, 서인석, 연동석, 이상일, Dynamic state 활성슬러지 공정에서 혐기조가 영양염류(C, N, P) 처리에 미치는 영향, *한국물환경학회지*, **15**(3), pp. 395-403 (1999).

박재로, 임현만, 김응호, 2단형 막분리 활성슬러지법(Two Stage MBR)에서 내부순환을 변화와 응집제 첨가에 의한 질소 및 인제거 특성에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **18**(2), pp. 131-140 (2002).

이원호, 서인석, 이상일, 4단 간헐폭기 활성슬러지 시스템에 의한 양돈폐수의 질소, 인 동시제거, *한국수질보전학회지*, **13**(3), pp. 331-338 (1997).

이정수, 표준 및 간헐포기식 활성슬러지법의 처리특성에 관한 비교연구(1), *대한환경공학회지*, **20**(9), pp. 1267-1278 (1998).

환경부, *하수도통제*, pp. 208-319 (2004).

허 목, 이용도, 한지용, SBR공정에서 포기/교반 시간비의 변화에 따른 하수의 질소·인제거, *한국수처리기술학회*, **63**(3), pp. 53-61 (2001).

허형우, 한화 유로 변경형 질소, 인 고도처리 기술, *한국물환경학회·대한상하수도학회·한국수도협회 공동출판 학술발표회 논문집*, pp. 227-230 (2000).

APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Ed., Washinton, DC. (1999).

Chiemchaisri, C., Wong, Y. K., Urase, T. and Yamamoto, K., Organic Stabilization and Nitrogen Removal in a Membrane Separation Bioreactor for Domestic Wastewater Treatment, *Filtration and Separation*, **30**(3), pp. 247-252 (1993).

Hasar, H., Klnacl, C., UnRi, A. and Ipek, U., Role of Intermittent Aeration in Domestic Wastewater Treatment by Submerged Membrane Activated Sludge System, *Desalination*, **142**, pp. 287-293 (2002).

Kang, I. J., Lee, C. H. and Kim, K. J., Characteristics of Microfiltration Membranes in a Membrane Coupled Sequencing Batch Reactor System, *Water Res.*, **37**, pp. 1192-2297 (2003).

Kimura, K., Watanabe, Y. and Ohkuma, N., Filtration Resistance and Efficient Cleaning Methods of the Membrane with Fixed Nitrifiers, *Water Res.*, **34**(11), pp. 2895-2904 (2000).