

ORIGINAL ARTICLE

호기성 생물막을 이용한 HRT 변화에 따른 오염물질 제거

안광호^{1,2)} · 고광백²⁾ · 김이태¹⁾ · 김광수^{1)*}

¹⁾한국건설기술연구원 환경연구실, ²⁾연세대학교 토목환경공학과

Pollutant Removal in Variable HRT Using the Aerobic Biofilm

Kwang-Ho Ahn^{1,2)}, Kwang-Baik Ko²⁾, I-Tae Kim¹⁾, Kwang-Soo Kim^{1)*}

¹⁾Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology,
Gyeonggi-Do 411-712, Korea

²⁾School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

Abstract

In this study, an experiment was conducted on influent water with low concentrations of organic matter, such as river water or secondary treatment water of a sewage treatment plant, according to HRT changes by using aerobic biofilm. In the biofilm process, as the biofilm increases in thickness, the inner membrane can be low in oxygen transfer rate and become anaerobic conditions, while the detachment of biomass from biofilm occurs. To overcome these limitations in the detachment of microorganisms in biofilm, the yarn, which was made from poly propylene(PP), was weaved and manufactured into a tube. Then, a test was carried out by injecting air so that the interior of the biofilm could create aerobic conditions.

The results of the experiment showed that the removal efficiency of TCOD_{cr} reached 66.1~81.2% by HRT 2hr, and 50.9~61.8% after HRT 1 hr. The removal efficiency of SCOD_{cr} was 45.9 to 55.1% by HRT 1hr, and 26.1% in HRT 0.5hr, showing the highest removal efficiency in HRT 1hr. The SS removal efficiency was at 81.8 to 94.6%, and the effluent SS concentration was very low, indicating less than 2.2 mg/L in all HRT's. As a result, the SCOD_{cr} and NH₄⁺-N that were removed per specific surface area and attached to microbial biofilm showed the highest efficiency in HRT 1hr with 8.37 gSCOD_{cr}/m²·d, 2.93 gNH₄⁺-N/m²·d. From the result of reviewing the characteristics of biofilm growth, microorganisms were found to be attached, and increased by 36 days. Later, they decreased in number through detachment, but showed a tendency to increase again 41 days later due to microbial reproduction.

Key words : Pollutant removal, Aerobic biofilm, HRT, Microorganisms

1. 서론

하천수나 하수처리장의 2차 처리수 등은 일반 하수에 비해 낮은 유기물 농도로 인하여 부유성장 미생물로 오염물질을 제거하기엔 슬러지 별킹, 유기물 부하 조건 등의 제한적인 요소가 많은 것으로 알려져 있다

(Rim 등, 1995 ; Ryu 와 Lee, 2006). 이러한 부유성장 미생물의 운전상 어려움을 해결하고자 여재의 개발과 함께 부착성장 미생물인 생물막 공정들이 개발되고 있으나, 유기물부하가 높을 경우, 시간경과에 따라 미생물 과다 증식에 의한 생물막의 탈리 현상 등이 발생

Received 16 August, 2012; Revised 20 September, 2012;

Accepted 13 November, 2012

*Corresponding author : Kwang-Soo Kim, Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-Do 411-712, Korea
phone: +82-31-9100-279
E-mail: kskim@kict.re.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

되며 이에 따른 오염물질 제거가 감소될 수 있다(Lee 등, 1997).

Choi 등(2003)은 생물막을 유지하는 여러 요소들로 용존산소(dissolved oxygen, DO), 수리학적 체류 시간(hydraulic retention time, HRT), 온도, 기질부하, 생물막의 두께 및 여재의 특성 등이 있다고 하였으며, 이중 수중의 용존산소는 유기물의 산화와 질산화에 중요한 영향을 준다. 용존산소와 생물막의 관계에 있어, 미생물이 부착된 생물막은 생물막의 두께가 두꺼워지게 되면 두꺼워진 생물막의 산소전달율에 따라서 수중의 용존산소와 접촉할 수 있는 생물막의 표면은 호기 조건, 중간층은 무산소조건, 막과의 접촉부분은 혐기 상태로 될 수 있다고 하였다(Chen 등, 2006 ; Semmens 등, 2003 ; Chung, 1994). 이렇게 막과의 접촉부분에서 혐기화가 된 생물막은 생물막의 두께와 관련된 산소전달 및 기질 확산의 한계 등으로 미생물의 부착력이 감소되어 막과 미생물이 쉽게 탈리되는 현상이 나타날 수 있으며 생물막에서 미생물이 장기간 유지되지 못하고 탈리되면 오염물질의 제거효율이 낮아지게 된다.

또한, 미생물에 의해 형성된 생물막의 표층은 주로 성장속도가 빠르고 유기물을 탄소원으로 섭취하는 종속영양 미생물(heterotrophic microorganisms)이 우점화하며, 성장이 느린 독립영양 미생물(autotrophic microorganisms)인 질산화 미생물은 생물막의 보다 안쪽에 형성되어 질산화 저해 및 미생물의 탈리를 유발할 수 있다(Lee 등, 2004 ; Harremoës 등, 1982 ; Tijhuis L. 등 1994).

유기물농도가 비교적 낮은 오염물질을 함유한 폐수에서 생물막을 활용할 경우, 미생물 활성을 유지할 수 있고, 성장속도가 느린 미생물에 적합한 서식환경을 제공할 수 있으며(Shin 등, 1995), 부착성장 미생물을 이용할 경우, 부유성장 미생물을 이용하는 것보다 온도와 충격부하에 강하며 수리학적 체류시간이 짧은 경우에도 안정적인 처리가 가능하다는 장점이 있다(Randall 과 Sen 등, 1996).

따라서, 본 실험은 미생물과 막사이의 혐기화 되어 쉽게 탈리되는 것을 막기 위해 튜브형태 호기성 생물막을 이용하여 생물막에 부착된 미생물의 내부로 산소가 공급되도록 하고, 저농도 유입수에서 부착미생물에 의한 오염물질 제거경향을 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 호기성 생물막 및 실험장치

Fig. 1은 실험에 사용된 호기성 생물막(aerobic biofilm tube)을 나타낸 것으로 poly propylene(PP)재질의 여러 가닥의 섬유사를 직조하여 튜브형태로 제작한 것으로 생물막의 표면에 미생물이 부착되고 내부로 공기를 주입하여 생물막 내부가 혐기화하지 않도록 제작하였으며, 튜브 내부로 주입된 용존산소가 확산에 의해 부착된 미생물로 산소전달이 되도록 하였다.

Fig. 2는 실험에 사용된 반응조를 나타낸 것으로 아크릴 반응조로 호기성 생물막을 반응조의 하부에 고정시키고 최대 공기량 80 L/min의 송풍기로 공기량 조절이 가능하도록 하고 공기는 튜브 내부로 충분히 공급되도록 제작하였다. 유입수는 반응조 중간에 격벽을 두어 반응조 상하로 유입수가 흐를 수 있도록 하여, 유입수와 tube에 부착된 미생물이 충분히 접촉할 수 있도록 하였다. 반응조에 사용된 호기성 생물막 튜브 및 제원은 Table 1에 나타내었다.

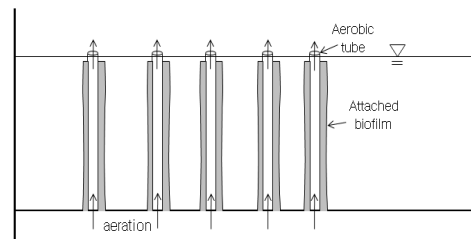


Fig. 1. Schematic diagram of aerobic biofilm tube.

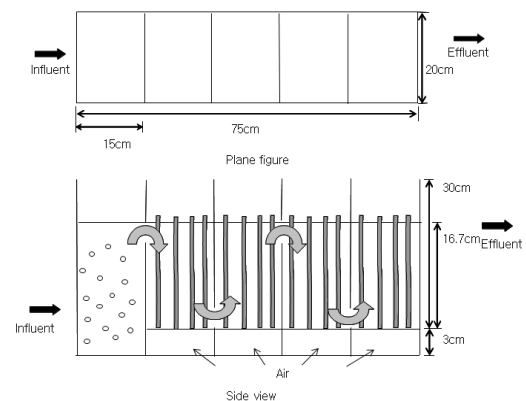


Fig. 2. Reactor with tube for water treatment.

Table 1. Properties of the reactor with tube

Items	Properties
tube diameter(\varnothing ,mm)	2
tube length(cm)	17
Number of tube(ea)	806
tube volume(cm^3)	430.2
tube surface area(cm^2)	8604.8
Reactor volume without tube(L)	19.86
Reactor size(L \times W \times H, cm)	60 \times 20 \times 30

2.2. 실험방법

실험에 사용된 유입수는 하수처리장 1차 침전지 유출수를 실험용도에 맞게 glucose, NH_4Cl , KH_2PO_4 와 수돗물을 혼합하여 사용하였다. 실험은 상온(약 20°C)에서 수행하였으며, 초기 10일간 HRT 6시간에서 마이크로 튜브에 미생물이 부착되도록 안정화 시킨 후 HRT 변화에 따라 시료를 분석하였으며, 미생물두께와 유기물 및 질산화를 최적화 할 수 있도록 수중의 용존산소의 농도는 4~5 mg/L로 유지하였다(Choi 등, 2003).

Table 2는 반응조 운전조건을 나타낸 것으로 SCOD_{cr} 은 HRT 6hr에서 0.5hr까지 HRT를 감소시켜 부하가 증가되도록 실험하였으며, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 6hr~2Ahr까지 증가시키고 HRT 2Bhr에서 1.78 g $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /d로 낮춰 실험한 후, 다시 부하율을 증가시켜 실험하였다. 시료의 분석은 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하여 분석하였으며, 반응조내 미생물량은 HRT 별로 미생물이 부착된 tube를 취해 세척하고 GF/C 여과지로 여과하여 건조전과 건조후의 무게차로 구해주었다.

Table 2. Operation conditions of the reactor

HRT(hr)	SCOD_{cr} (mg/L)	SCOD_{cr} loading rate (g SCOD_{cr} /d)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (mg/L)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ loading rate (g $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /d)
6	33.5	2.73	11.6	0.95
3	30.6	4.98	10.5	1.72
2A	32.9	8.05	11.0	2.70
2B	30.0	7.35	7.3	1.78
1	27.3	13.38	7.6	3.71
0.5	13.4	13.14	7.3	7.12

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거

Fig. 3은 HRT 변화에 따른 TCOD_{cr} 의 농도변화 및 제거효율을 나타낸 것으로, HRT에 따른 평균값은 HRT 6hr~2hr까지 유입수의 TCOD_{cr} 농도는 71.1~118 mg/L, 처리수의 TCOD_{cr} 농도는 13.3~41.1 mg/L였으며, TCOD_{cr} 의 제거효율은 69.9~81.2%로 점차 증가하는 경향이 나타났다. HRT 1hr~0.5hr까지 저농도에서 유입수의 TCOD_{cr} 농도는 21.0~64.2 mg/L, 처리수의 TCOD_{cr} 농도는 10.1~25.8 mg/L로 제거효율은 61.8, 50.9%로 유입수의 TCOD_{cr} 농도가 감소함에 따라 처리수의 TCOD_{cr} 농도도 다소 감소되었다.

Fig. 4는 HRT 변화에 따른 SCOD_{cr} 농도변화 및 제거효율을 나타낸 그림으로 유입수 SCOD_{cr} 농도는 HRT 6hr~HRT 2hr까지 18.3~44.1 mg/L로 유입되었으며, 처리수 SCOD_{cr} 은 11.8~22.2 mg/L였다. HRT 1hr~HRT 0.5hr에서의 SCOD_{cr} 유입수는 10.5~43.1 mg/L로 유입되었으며 처리수 SCOD_{cr} 은 8.2~17.2 mg/L였다. SCOD_{cr} 의 제거효율은 HRT 6hr~1hr까지 45.9~55.1%로 유사한 제거효율을 나타내었으며, HRT 0.5hr에서 26.1%로 낮은 제거효율을 나타내었다. TCOD_{cr} 와 SCOD_{cr} 는 HRT 감소에 따라 유입수의 부하가 증가되었으나 처리수 농도는 비교적 일정한 농도를 유지하였다.

Fig. 5는 HRT 변화에 따른 SS 농도변화 및 제거효율을 나타낸 것으로 유입수 SS가 HRT 6hr~2hr까지 10.0~57.0 mg/L로 유입되었으며, 처리수 SS는 1~6 mg/L로 나타났으며 이때의 평균 SS 제거효율은 약 94%였다. HRT 1hr~HRT 0.5hr에서의 SS 유입수는 4~24 mg/L였으며, 처리수 SS는 0.5~3 mg/L로 이때 평균 SS 제거효율은 80% 이상으로 나타났다. SS는 유입수의 SS 농도편차가 큰 것에 비해 처리수의 SS 농도는 매우 안정적인 처리수 농도를 나타내었는데, 이는 SS가 유입수와 함께 상하로 이동되면서 입자들이 튜브에 부착되고, 일부는 침전되는 구조와 생물막의 안정적인 부착 때문으로 판단된다. 고정생물막의 COD와 SS의 안정적인 처리수질은 Kim 등(2002a)에서도 나타나는데, 본 실험에서는 보다 낮은 SCOD_{cr} 30 mg/L 이하의 평균 유입수 농도에서도 안정적인 처리수질이 나타났다.

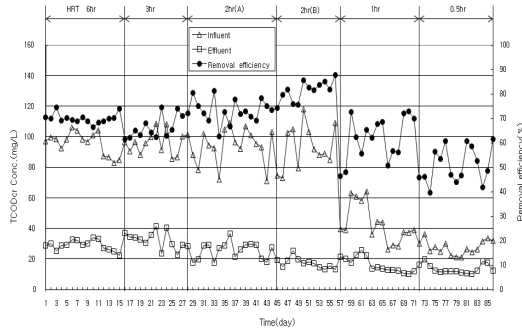


Fig. 3. TCOD_{cr} concentration and removal efficiency with various HRT.

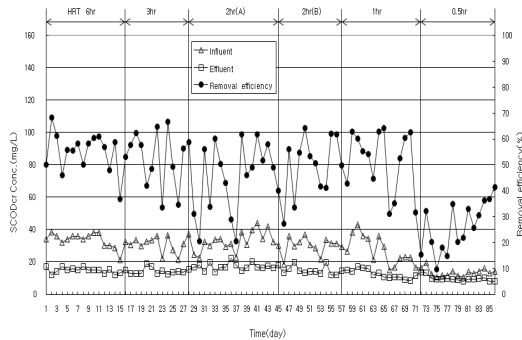


Fig. 4. SCOD_{cr} concentration and removal efficiency with various HRT.

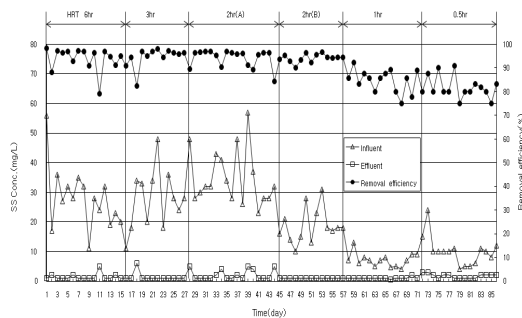


Fig. 5. SS concentration and removal efficiency with various HRT.

3.2. 질소 제거

Fig. 6은 HRT 변화에 따른 T-N 농도변화 및 제거효율을 나타낸 것으로 유입수 T-N은 10.7~15.4 mg/L이었으며, 처리수의 T-N 농도는 8.9~12.0 mg/L로 제거

효율은 HRT 6hr~HRT 2Ahr까지의 16.7~22.2%, HRT 2Bhr~HRT 0.5hr에서는 10.4~19.4%의 T-N 제거효율이 나타났다.

Fig. 7은 HRT 변화에 따른 NH₄⁺-N 농도변화 및 제거효율을 나타낸 그림으로 HRT 6hr~HRT 2Ahr까지 유입수의 NH₄⁺-N 농도는 7.1~14.4 mg/L로 유입되었으며, 처리수의 NH₄⁺-N 농도는 0.1~6.0 mg/L로 NH₄⁺-N의 제거효율은 57.6~89.0%였다. HRT 2Bhr~HRT 0.5hr에서 유입수의 NH₄⁺-N 농도는 5.5~11.6 mg/L로 유입되었고, 처리수의 NH₄⁺-N 농도는 0.2~7.8 mg/L로 제거효율은 37.5~86.2%였다. HRT 2Ahr에서 충분한 질산화가 이루어지지 않았으며, 다른 조건은 그대로 하고 유입수의 NH₄⁺-N의 농도를 낮춰 부하율을 낮춘 HRT 2Bhr에서 NH₄⁺-N 제거효율이 57.6%에서 86.2%로 향상되었고, 이후 NH₄⁺-N 부하량의 증가에 따라 NH₄⁺-N의 제거효율은 점차 낮아져 HRT 0.5hr에서는 NH₄⁺-N 제거효율이 37.5%로 낮아졌다.

Fig. 8은 HRT 변화에 따른 NO₃⁻-N 농도변화를 나타낸 그림으로 NO₃⁻-N의 질산화 경향에 따라, HRT 6hr~HRT 2Ahr까지 유입수의 NO₃⁻-N 농도는 1.3~3.3 mg/L로 유입되었으며, 처리수의 NO₃⁻-N 농도는 4.1~11.6 mg/L로 나타났다. HRT 2Bhr~HRT 0.5hr에서 유입수의 NO₃⁻-N 농도는 0.3~2.6 mg/L로 유입되었고, 처리수의 NO₃⁻-N 농도는 2.3~7.5 mg/L로 나타나 질산화는 메디아표면의 질소부하율과 밀접한 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있었다(Boller 등, 1994).

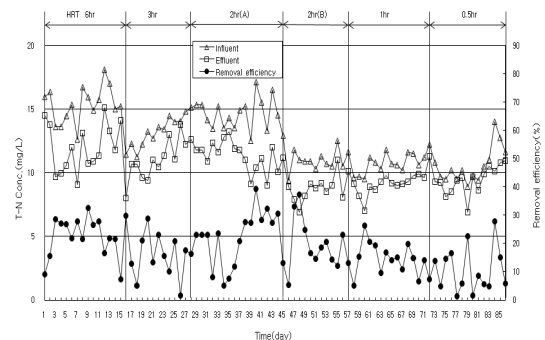


Fig. 6. T-N concentration and removal efficiency with various HRT.

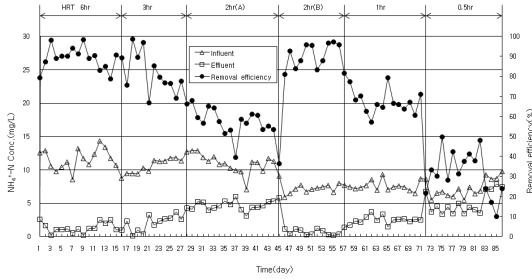


Fig. 7. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration and removal efficiency with various HRT.

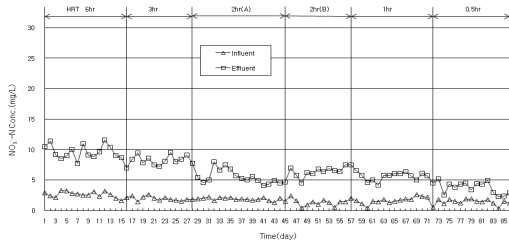


Fig. 8. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration with various HRT.

3.3. 표면부하에 따른 유기물 및 질소제거특성

Table 3은 HRT변화에 따른 F/M 비와 SCOD_{cr} 부하를 나타낸 것으로 HRT의 감소에 따라 F/M 비, 표면적당 부하율은 증가되고 HRT 1hr에서 F/M 비, 표면적당 SCOD_{cr} 부하, 표면적당 SCOD_{cr} 제거량이 각각 $0.24 \text{ kgSCOD}_{\text{cr}}/\text{kgMLSS}\cdot\text{d}$, $15.55 \text{ gSCOD}_{\text{cr}}/\text{m}^2\cdot\text{d}$, $8.37 \text{ gSCOD}_{\text{cr}}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ 로 가장 높고 HRT 0.5hr에서는 오히려 감소되는 경향이 나타났다. 튜브 비표면적당 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거량도 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 부하량에 따라 HRT 1hr에서 가장 높은 $2.93 \text{ gNH}_4^+\text{-N}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ 로 나타나 HRT 1hr

에서의 유기물 및 질산화 효율이 가장 높게 나타났다.

Fig. 9와 10은 표면부하에 따른 SCOD_{cr} 및 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거효율을 나타낸 그림으로 표면부하율 증가에 따라 SCOD_{cr} 및 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거효율은 둘다 낮아지는 경향을 보였으며, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 SCOD_{cr} 에 비해 표면부하율 증가에 따라 제거효율이 급격히 낮아져 튜브표면적당 부하에 큰 영향을 받았으며, Boller 등(1994)과 Kim 등(2002a)은 질산화에 있어, 매디아 비표면적에 따른 부하율이 주요설계인자라 하였다. 튜브에 부착된 미생물에 의한 질산화율을 산정하기 위해 표면부하에 따른 질산화율(specific nitrification rate, SNR)을 산정해 본 결과, HRT 6, 3, 2A, 2B, 1, 0.5hr에서 각각 $0.033, 0.034, 0.028, 0.027, 0.069, 0.051 \text{ mgNH}_4^+\text{-N}/\text{mgMLVSS}\cdot\text{d}$ 로 HRT 1hr에서 질산화율이 가장 높게 나타났으며, 평균 SNR은 $0.041 \text{ mgNH}_4^+\text{-N}/\text{mg MLVSS}\cdot\text{d}$ ($1.708 \text{ mgNH}_4^+\text{-N}/\text{gMLVSS}\cdot\text{hr}$)로 Hay 등(2009)의 $1.42 \text{ mgN}/\text{gMLVSS}\cdot\text{hr}$ 과 Park 등(2009)의 $0.035 \text{ mgNH}_4^+\text{-N}/\text{mgMLVSS}\cdot\text{d}$ 와 비교해 볼 때, 본 실험에서 양호한 질산화율을 나타내었다.

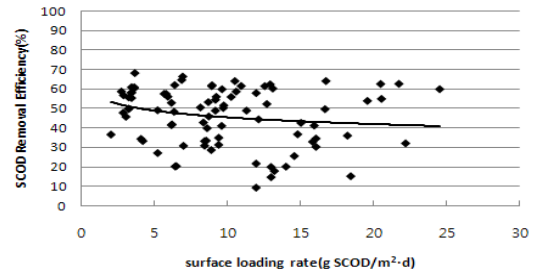


Fig. 9. SCOD_{cr} removal efficiency with various surface loading rate.

Table 3. F/M ratio and SCOD_{cr} loading with various HRT

HRT (hr)	F/M ratio ($\text{kgSCOD}_{\text{cr}}/\text{kgMLSS}\cdot\text{d}$)	SCOD_{cr} loading per surface area ($\text{gSCOD}_{\text{cr}}/\text{m}^2\cdot\text{d}$)	Removal SCOD_{cr} per surface area ($\text{gSCOD}_{\text{cr}}/\text{m}^2\cdot\text{d}$)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ loading per surface area ($\text{mgNH}_4^+\text{-N}/\text{m}^2\cdot\text{d}$)	Removal $\text{NH}_4^+\text{-N}$ per surface area ($\text{gNH}_4^+\text{-N}/\text{m}^2\cdot\text{d}$)
6	0.07	3.18	1.77	1.10	0.98
3	0.09	5.80	3.10	1.99	1.62
2A	0.10	9.30	4.49	3.14	1.82
2B	0.10	8.54	4.29	2.07	1.76
1	0.24	15.55	8.37	4.31	2.93
0.5	0.16	15.27	4.11	8.28	2.52

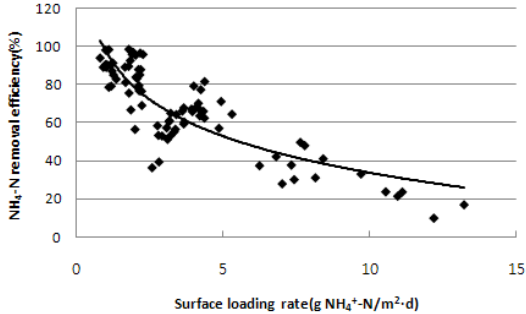


Fig. 10. NH₄⁺-N removal efficiency with various surface loading rate.

3.4. 생물막 성장특성

Fig. 11은 경과일수에 따른 부착미생물 군집량의 변화에 대하여 나타낸 것으로 부착성장미생물이 부착하고 꾸준히 증가하는 경향을 보였으며, 36일 이후 부착미생물량이 탈리에 의해 감소되고 다시 41일 이후 미생물의 재생산으로 인해 증가되어지는 경향을 반복해서 나타냈다. Park과 Song(1998), Kim 등 (2002b)의 실험에서 생물막이 부착되어 약 15~18일 이후부터 성장속도가 감소하며 탈리되는 현상이 나타나는데, 본 실험에서 생물막은 약 36일까지 성장하며 증가되어 미생물의 부착이 양호하게 지속되었으며, 탈리 후에도 미생물이 안정적으로 유지되었다.

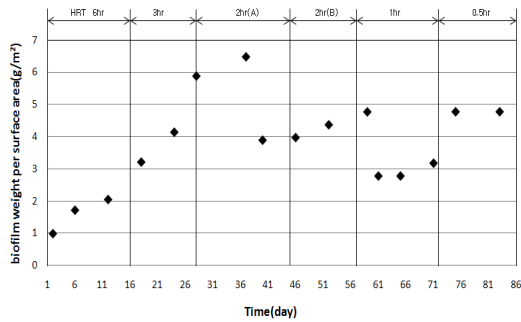


Fig. 11. Variation of net biofilm growth in the reactor.

Fig. 12는 호기성 튜브에 부착된 미생물을 나타낸 것으로 초기 미생물 부착이 서서히 이루어져 점차 호기성 튜브에 미생물이 형성된 후 생물막이 양호하게 유지되었다.



Fig. 12. Attached biofilm on the tube(Up : Initiation of biofilm formation, Down : Maximum of biofilm formation).

4. 결론

실험실 규모의 호기성 생물막 반응조를 제작하여 HRT 변화에 따라 유기물 및 질소제거의 특성을 살펴본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 유기물 제거에서 TCOD_{cr}, SCOD_{cr}의 경우, 유입수 부하가 증가되었으나 처리수 농도는 일정한 농도를 유지하였으며, SS는 유입수의 부하변동에 상관없이 처리수 SS가 2.2 mg/L 이하로 매우 안정적으로 처리되었다.

2) 생물막 표면부하율에 따른 SCOD_{cr} 및 NH₄⁺-N 제거효율을 살펴본 결과, 표면부하율에 따른 NH₄⁺-N의 제거효율이 SCOD_{cr}에 비해 크게 낮아지는 경향으로 NH₄⁺-N는 SCOD_{cr}에 비해 튜브 표면적당 부하에 큰 영향을 받았다.

3) 호기성 생물막의 비표면적에 따른 유기물 및 제거특성에서, 비표면적당 SCOD_{cr} 과 NH₄⁺-N이 각각 8.37 gSCOD_{cr}/m²·d과 2.93 gNH₄⁺-N/m²·d로 HRT 1hr에서의 유기물 및 질산화 효율이 가장 높게 나타났다. 평균 질산화율(SNR)은 0.041 mgNH₄⁺-N/mgMLVSS·d

(1.708 mgNH₄⁺-N/gMLVSS-hr)로 양호한 질산화가 나타났다.

4) 호기성 생물막의 성장특성을 살펴본 결과, 약 36 일까지 지속적인 미생물의 부착 및 성장이 있었으며 이후, 생물막의 탈리에 의해 미생물은 감소되며 다시 재생성되는 경향을 보였으며, 부착된 미생물은 안정적으로 유지되었다.

참 고 문 헌

- APHA, 1998, AWWA, WEF, Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 20th edition.
- Boller, M., Gujer, W., Tschui, M., 1994, Parameters affecting nitrifying biofilm reactors, *Water Science and Technology*, 29(10-11), 1-11.
- Chen, S., Ling, J., Blancheton, J. P., 2006, Nitrification kinetics of biofilm as affected by water quality factors, *Aquacultural Engineering*, 34(3), 179-197.
- Choi, D. H., Bae, W., Park, S. J., Chung, J. W., 2003, Characteristics of wastewater treatment according to the variation of HRT and DO in biological aerated filter process, *J. of KSEE*, 25(11), 1337-1343.
- Chung, J. C., 1994, Microbial aspects of the biofilm, *J. of KSEE*, 16(5), 589-600.
- Hay, C. T., Khor, S. L., Darren, D. S., James, O. L., 2009, Influence of a prolonged solid retention time environment on nitrification/ denitrification and sludge production in a submerged membrane bioreactor, *Desalination* 245(1-3), 28-43.
- Harremoës, P., 1982, Criteria for nitrification in fixed film reactors, *Water Science and Technology*, 14(1-2), 167-187.
- Kim, M. H., Rah, S. W., Cho, K. K., Park, T. J., 2002a, Nitrogen removal reproducibility from weak organic sewage using pilot scale BNR process applied fixed biofilm, *J. of KSEE*, 24(6), 995-1003.
- Kim, I. T., Park, J. N., Chung, W. S., Song, H. M., 2002b, Removal characteristics of the low concentration sewage discharged into stream by biofilm method, 2002 KSWW&KSWQ fall conference, D31-C34.
- Lee, C. G., Kim, J. S., Kang, I. S., Lee, B. H., 1997, A study of attached biomass back washing in fixed film system, *J. of the Korean environmental sciences society*, 6(3), 219-224.
- Lee, L. Y., Ong, S. L., Ng, W. J., 2004, Biofilm morphology and nitrification activities: recovery of nitrifying biofilm particles covered with heterotrophic outgrowth, *Bioresource Technology*, 95(2), 209-214.
- Park, J. B., Park, S. K., Hur, H. W., Kang, H., 2009, Estimation of kinetic coefficient in submerged membrane bioreactor for biological nutrient removal, *J. of KSEE*, 32(2), 109-113.
- Park, Y. S., Song, S. K., 1998, Influence of substrate on the micororganisms attachment and the biofilm growth, *J. of KSEE*, 20(11), 1579-1589.
- Randall, C., Sen, D., 1996, Full-scale evaluation of an integrated fixed-film activated sludge(IFAS) process for enhanced nitrogen removal, *Water Science and Technology*, 33(12), 155-162.
- Rim, J. M., Kwon, J. H., Han, D. J., 1995, Control of excessive biofilm for the treatment of high strength organic wastewater by biofilm process, *Korean J. sanitation*, 10(3), 67-77.
- Ryu, H. D., Lee, S. I., 2006, Comparison of removal characteristics of organic matter, nitorgen and phosphorus in suspended-growth and hybrid processes with hydraulic retention time, *J. of KSEE*, 28(1), 15-25.
- Semmens, M. J., Dahm, K., Shanahan, J., Christianson, A., 2003, COD and nitrogen removal by biofilms growing on gas permeable membranes, *Water Research*, 37(18), 4343-4350.
- Shin, H. S., Lim, K. H., Lee, E. S., Choi, G. W., 1995, Removal of organic contaminants in water supplies by biofilm reactor, *J. KSWQ*, 11(4), 341-349.
- Tijhuis, L., van Loosdrecht, M. C. M., Heijnen, J. J., 1994, Formation and growth of heterotrophic aerobic biofilms on small suspended particles in airlift reactors, *Biotechnology Bioengineering*, 44(5), 595-608.