

Alum 주입 메쉬 침지 여과분리형 생물반응조의 운전 특성과 인 제거

정용준 · 민경석^{*,†}

환경관리공단 유역관리처

^{*}경북대학교 환경공학과

Phosphorus Removal and Operating Performance of Mesh Filtration Bio-reactor with the Addition of Alum

Yong-Jun Jung · Kyung-Sok Min^{*,†}

Department of Watershed management, Environmental management corporation

^{*}Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

(Received 24 January 2005, Accepted 25 May 2005)

Abstract

Considering the characteristics of a filtration bio-reactor equipped with a mesh filter module which can effectively maintain high concentration of biomass and enhanced solid-liquid separation performance, the hybrid process of filtration bio-reactor combined with coagulation was investigated to get improved filtration characteristics as well as water quality in this work. Two bio-reactors (Run-1 & Run-2) were operated under the following conditions: working volume of 25 L, continuous loading of a synthetic wastewater (BOD: 200 mg/L, T-N: 50 mg/L, T-P: 5 mg/L), where an appropriate amount of alum ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) was added once a day into the reactor (Run-2). In the system without using a alum (Run-1), the clogging of mesh filter module was observed two times through 85 days of whole operation. Meanwhile, the filter module did not clog even at higher MLSS concentration (6,000~12,000 mg/L) and the stable filtration (0.7 m/d) was continued in the case of using a alum. Due to the stable formation of cake layers, BOD and SS were shown below 6 and 3 mg/L, respectively. T-P and pH of the effluent were changed because of the intermittent addition of the alum. In the case of Al/P=2.5, the average T-P removal efficiency per day was 85.2% and the average T-P concentration of the effluent was 0.3 mg/L. However, the removal efficiency of phosphate was influenced by pH in the reactor.

keywords : Filtration bio-reactor, Clogging, Alum, Phosphorus, Advanced treatment

1. 서론

소규모 오·폐수처리 시설에서 배출되는 영양염류들이 내만과 호소등과 같은 폐쇄성 수역에 유입될 경우 부영양화의 주된 원인으로 작용한다. 특히 인은 미생물에 의한 분해가 어렵고, 이상 조류 번식에 지배적인 역할을 수행하기 때문에 이 같은 수역에 유입되지 않도록 하기 위한 사전 예방이 중요하다. 하지만, 기존 처리시설의 대부분을 차지하고 있는 국내의 생물학적 오·폐수처리 공정으로는 안정적인 방류수 수질기준조차 준수하기 어려운 실정이다.

침지형 막분리 활성슬러지공정(Membrane Bio-reactor, MBR)은 생물반응조에 고농도의 다양한 미생물량을 유지할 수 있고, 막에 의한 완벽한 고액분리가 가능하여 처리수의 수질이 양호할 뿐만 아니라, 장치의 콤팩트화와 효율화가 가능한 새로운 고도처리공정으로 자리 잡고 있다 (Liu et al., 2005; Howell et al., 2004; 김 등, 2001). 그러나, MBR공정

의 많은 장점에도 불구하고, 장기간 연속적으로 운영을 하면 막오염 현상이 진행되고, 더 이상의 운전이 어려운 폐색까지 이르게 된다. 또한 생물반응조의 미생물 체류시간을 오랫동안 유지하도록 운전하기 때문에 슬러지 제거시에 함께 제거되는 인과 같은 무기 영양물질의 제거율은 일반적인 생물학적 영양소 제거공정(Biological Nutrient Removal, BNR)과 비교하여 낮은 것으로 지적되고 있다(김 등, 2001).

오·폐수내에서의 인은 물리적 특성에 따라 용존성과 입자성 형태로 존재하므로, 알루미늄과 철과 같은 응집제를 주입하면 흡착, 침전 또는 여과의 형태로 제거될 수 있다. 이는 응집침전법과 같이 3가의 금속염이 물속에 존재하는 정인산 이온(PO_4^{3-})과 반응하여 불용성 인산염을 생성하는 반응에 따른다고 할 수 있다(박 등, 2000).

따라서 MBR공정의 생물반응조에 다양한 종류의 응집제를 주입하여 용해성 인 성분을 불용성 입자성 물질로 형성시켜 침전 또는 여과작용으로 제거하기 위한 응집제 첨가 MBR공정이 연구되고 있다. 이와 같은 혼성공정을 통하여 향상된 인제거 효율과 함께 오염 입자의 크기가 증가하므로 막 세공의 막힘 현상이나 케이크 층 형성을 억제하는

[†] To whom correspondence should be addressed.
ksmin@knu.ac.kr

여과특성까지 개선된 사례들을 볼 수 있다(노 등, 2003; 최 등, 2004; 박 등, 2002; Yoon et al., 2004). 정수 처리에서도 응집-막분리 공정을 이용함에 따라 플럭스와 처리 수질 향상을 도모하고 있다(문 등, 2003).

한편, 100 μm 의 mesh를 여재로 사용한 여과분리형 생물반응조(Mesh Filtration Bio-reactor, MFBR)로도 MBR공정의 처리 수질에 상응하는 하수처리 효율을 나타낸 바 있다. 이전 연구(Kiso et al., 2000; 정 등, 2000; 정 등, 2001)에서 연속포기는 물론이며, 향상된 인 제거효율을 얻기 위하여 간헐포기까지 운전하였으나, MBR공정에서와 같이 단일 반응조로는 활성슬러지 여과막에 의한 여과 제거율과 슬러지 폐기량에 따른 제거를 정도 밖에 기대할 수 없었다.

본 연구는 MFBR의 단일 반응조내에 alum을 주입한 응집-여과분리형 생물반응조와 대조 반응조를 운전함으로써, alum 주입량 변화에 따른 여과분리와 수 처리 특성을 비교·평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 mesh 침지여과분리형 생물반응조의 전체 흐름도를 Fig. 1에 표시하였는데, 이는 크게 유입수 저류조, 공급 펌프, 여과분리 생물반응조 및 유출부로 구성되어 있다. 아크릴로 제작된 유효용적 25 L의 생물반응조 내부에는 flux 조절을 용이하게 할 수 있도록 2매의 여과 모듈을 침지시켰다. 여과 모듈은 평막과 유사하게 지지체를 내부에 두고, 100 μm 의 나일론 메쉬를 둘러서 제작하였으며, 막면적은 0.0536 m^2 /매로 하였다.

MBR 공정에서와 마찬가지로 안정된 연속 운전이 가능하도록 공기포 용동방식의 막세정을 위하여 포기 세정 장치를 여과모듈 바로 아래 부분에 설치하였다. 또한 산소공급과 활성슬러지의 원활한 유동을 위하여 반응조 하부의 벽면 주위로 산기관을 설치함으로써 양측선회류를 유도하였다. 본 반응조는 Fig. 1에 표시한 바와 같이 간헐적인 흡입·정지를 되풀이하는 MBR반응조와 달리, 유입수의 연속 주입과 투과수의 연속 유출이 가능하도록 구성하였다.

2.2. 운전방법

동일한 생물반응조 2대를 준비하여 응집제로 사용한

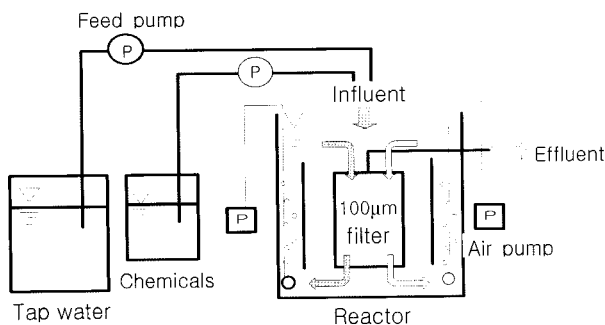


Fig. 1. Lay-out of mesh filtration bio-reactor.

alum($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)의 주입 여부가 여과분리와 수 처리, 특히 인 제거 특성에 미치는 영향을 비교하였다. Table 1에 제시한 바와 같이 alum을 주입하지 않은 반응조(Run-1)와 alum을 주입한 반응조(Run-2)로 구분하였다. Run-2에서는 alum 주입량의 변화에 따라 반응조내의 pH가 변화하였으나, 별도의 조절은 실시하지 않았으며, 나머지는 비교적 동일한 조건이 되도록 설정하였다. Run-2의 반응조에 alum을 주입하기 앞서, 활성슬러지가 존재하는 가운데 용존성 인성분을 불용성 인산염으로 전환시키는데 필요한 최소한의 alum 주입량을 파악하기 위하여 Jar-test를 회분식으로 실시하였다. 박 등(2000)의 연구 결과를 참고로 하여, rpm과 MLSS 농도를 각각 150과 5,000 mg/L로 고정한 후, Al/P의 물비를 0~2.5까지 변화시키면서 일정 시간 경과 후 상등수를 분석하여 제거되는 인 제거율로 적정 주입량을 평가하였다. 실제 운전시에는 Jar-test에서 설정된 alum 양을 기준으로 운전 모드별로 소량씩 변동시켰으며, alum은 매일 일회씩 주입하였다.

Table 1. Operating condition and influent characteristics

Parameters	Run-1	Run-2	Influent(mg/L)
Temperature($^{\circ}\text{C}$)	20		BOD: 200
Working volume(L)	25		T-N: 50
HRT(hr)	8		T-P: 5
Flux(m/d)	0.7		
DO(mg/L)	1~3		
pH	7.0~7.3	5.3~7.3	
Al/P	-	1.5~2.5	

유입수는 일정 성상을 유지하기 위하여 skim milk, NH_4Cl , K_2HPO_4 및 미량원소를 적절히 혼합하여 Table 1에 표시한 농도가 되도록 제조하였다. 여과 모듈은 매일 1회씩 30초간 공기 세정만 실시하였고, 반응조에 눈금 표기된 수두차가 10 cm를 초과할 경우는 여과 막 폐색으로 간주하여 반응조 외부로 드러내어 수돗물로 세정한 후 다시 주입하였다.

모든 여과수는 수질오염공정시험법(1998)과 Standard Methods(1998)에 준하여 분석하였으며, 1일 혼합시료로 채취한 후 수질분석을 실시하였으며, 운전 형태가 변경될 경우에는 최소한 일주일 이상의 적응 기간을 두었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Jar-test

응집제로서 alum을 사용한 응집-여과분리형 생물반응조의 적정 alum 주입량을 결정하기 위하여 Al/P비 값을 가변 항목으로 설정하여 Jar-test를 실시하였다.

Al/P비를 0에서 2.5까지 단계적으로 변화시키면서 1시간 동안 인 제거율을 관찰한 결과는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. Al/P비가 증가할수록 T-P제거율은 증가하였는데, 모든 실험조건에서 alum 주입 초기에는 높은 T-P 제거율을 나타

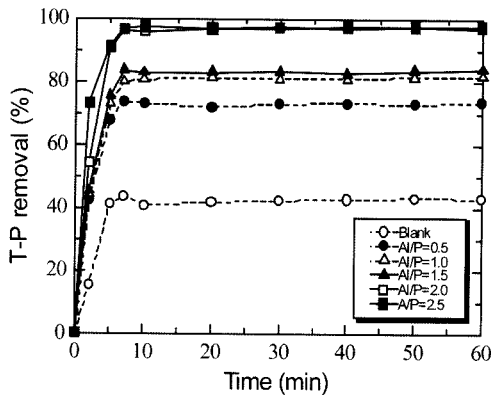


Fig. 2. Profiles of T-P removal rate vs. Al/P dosing ratio.

내다가, 대부분 10분 정도가 경과한 이후로는 T-P제거율의 변화폭이 완만한 것으로 나타났다.

T-P제거율 90%이상, 즉 용존 농도 0.5 mg/L 이하를 유지하기 위해서는 Al/P비를 2 이상 유지하여야 하고, 그 이상의 Al/P비를 유지할 경우, 제거율은 소폭 향상되었지만 경제성을 고려할 경우 Al/P비는 2정도를 유지하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

3.2. 여과분리 특성

85일간의 전체 운전 경과일에 따른 Run-1과 Run-2의 MLSS, MLVSS 및 수두차의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. alum을 주입하지 않은 Run-1에서는 11일과 52일째 두 차례에 걸쳐 수두차가 10 cm 이상, 즉 폐색을 일으켜 더 이상의 운전이 불가능하였기 때문에 여과 모듈을 반응조 외부로 드러내어 수돗물로 세정하였다.

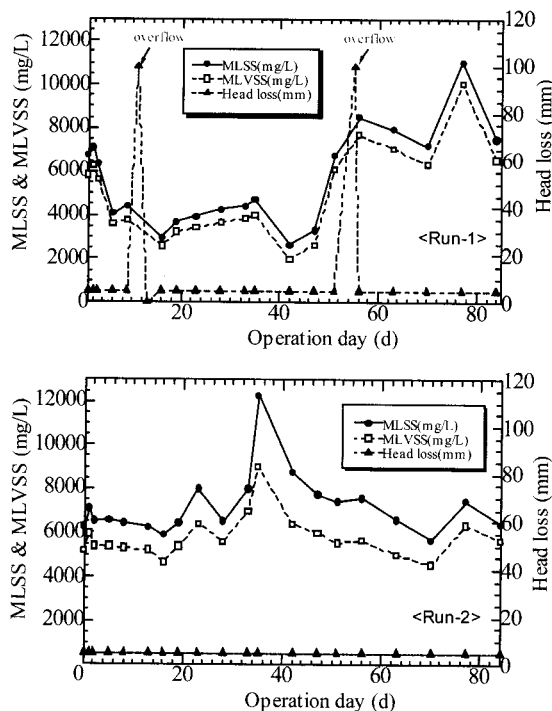


Fig. 3. Monitoring of MLSS, MLVSS and Head loss at different operating modes.

Al/P비가 1.5~2.5정도 되도록 alum을 주입한 Run-2에서는 반응조내의 MLSS가 Run-1보다 전반적으로 높은 6,000~12,000 mg/L범위내로 유지하더라도 전체 운전기간 동안 5 mm이내의 안정한 수두차를 유지하였다. 또한 투과 압력 즉, 수두차는 본 연구에서 적용한 Al/P 범위내에서는 영향을 받지 않았다.

일반적으로 침지형 MBR공정에서는 미생물의 농도가 증가할수록 점도가 상승하여 막오염 진행속도도 빨라지므로, 운전 압력이 증가한다 (Ueda et al., 1997). 하지만 응집제를 주입할 경우, 오·폐수중에 부유하고 있는 콜로이드성 입자들이 서로 응집하여 보다 큰 입자성 물질을 형성함으로써 슬러지 케이크층의 특성이 변하게 되어 여과특성도 향상되는 것으로 사료된다. 본 반응조는 막을 이용한 MBR 공정들의 투과기구와는 달리, 여과재 표면에 형성되는 슬러지 케이크층을 이용하여 여과수를 배출하므로, 이의 역할이 중요하다.

Fig. 4에 SVI와 MLSS의 관계를 도시하였다. Run-2에서는 Run-1보다 큰 MLSS의 농도변화에도 불구하고, 상대적으로 낮은 80 이하의 안정된 SVI를 나타내고 있다. 이는 alum을 주입함으로써 미세 콜로이드성 오염 입자를 제거하여 슬러지의 침강성을 향상시켰던 원인으로 해석된다.

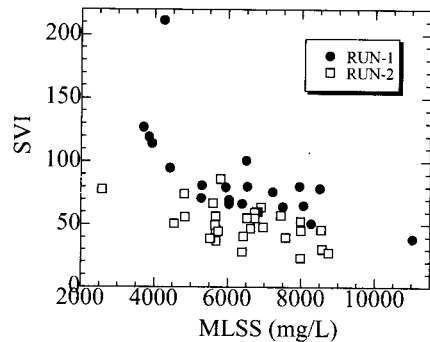


Fig. 4. Plotting of SVI vs. MLSS.

또한, Fig. 5에 나타난 바와 같이 Run-1과 Run-2 반응조 모두 SVI에 무관하게 SS로서 10 mg/L 이하의 안정된 여과수를 배출하여 본 시스템의 우수한 여과분리특성을 간접적으로 시사하였다. 특히 Run-2의 경우 80 이하의 SVI에서 SS 4 mg/L 이하의 여과수를 배출하였다.

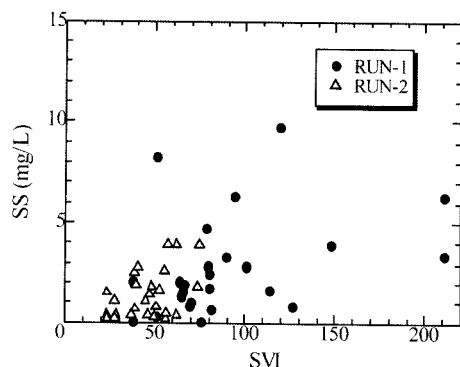


Fig. 5. Profile of SS vs. SVI.

Run-1에서 반응조내의 미생물량 즉 MLVSS/MLSS를 관찰한 결과, 77.4~83.2%의 범위로 유기물의 농도가 다소 높게 나타났지만, Run-2에서는 alum을 사용하였기 때문에 70.8~80.8%의 범위를 나타내어 상대적으로 미생물량이 적은 것으로 분석되었다.

이상과 같이 응집-여과분리형 생물반응조로도 85일 동안 막 폐색없이 0.7 m/d의 높은 flux를 안정되게 유지하면서 운전할 수 있었다.

3.3. 수처리 특성

전체 운전 기간동안의 Run-1과 Run-2의 평균 여과수질을 Table 2에 정리하였다. alum 주입 여부에 관계없이 여과수의 SS와 BOD는 각각 3과 6 mg/L 이하로 낮게 나타났는데, BOD의 경우 97.4~98.9%의 높은 제거 효율을 보였다.

반응조내의 평균 MLVSS가 6,000 mg/L 전후임에도 불구하고, 높은 SS와 BOD 제거효율을 나타낸 것은 여과재 표면에 안정되게 형성된 슬러지 케이크층의 역할이 중요하게 작용한 원인으로 해석된다. 특히, alum을 주입한 Run-2에서는 SVI의 변화를 관찰한 Fig. 4에서도 나타낸 바와 같이, 반응조내의 슬러지 플록들의 응집,흡착 효과가 향상되어 보다 안정된 케이크층을 형성하였으므로, 여과수의 SS가 더 낮게 배출된 것으로 사료된다. 오·폐수중의 용존성 인 제거와 여과분리의 특성 향상을 위해 생물반응조에 응집제를 주입할 경우, 미생물의 활성에 유해한 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라, 미생물 대사 산물과 반응해서 유기 고형물의 제거율이 향상되고 활성슬러지의 팽화현상등이 감소(Spatzierer et al., 1985)하였다는 것과 같이, 본 연구에서도 응집제 주입에 관계없이 여과수의 NH₄-N농도가 1 mg/L 이하로 거의 완전 질산화가 이루어진 것으로 보아, 응집제 주입이 반응조내의 미생물에 미치는 독성 등은 없었던 것으로 사료된다.

탈질반응이 진행될 수 있는 무산소조를 별도로 설치하지 않았음에도 불구하고, 38.8~45.3%의 비교적 양호한 T-N 제거율을 나타내었는데, 이는 고농도의 MLSS유지가 가능하였다는 것과, mesh여재 표면에 형성된 슬러지 케이크층이 탈질에 필요한 무산소조 역할을 수행한 것과 같은 영향들이 복합적으로 작용했던 원인으로 분석된다.

Alum을 주입하지 않은 Run-1에서는 인 제거 공정을 위한 혐기조를 별도로 설치하지 않았음에도 불구하고, 일반적인 활성슬러지 공정에서 제시되는 10~20%의 인 제거 효율보다는 다소 높은 평균 28.4%의 인제거와, 유출수 3.6

mg/L를 나타냈다.

한편, Jar-test에서는 적정 alum 주입량이 Al/P비로 1.5정도 였지만, 실제 pilot plant운전(박 등, 2000)에서는 주입량이 감소하더라도 양호한 처리수질을 확보하였다는 연구 결과를 참고로 하여, Run-2에서는 Al/P비를 단계적으로 1.5에서 2.5까지 조절하였다. Run-2에서는 65.2~93.8%의 제거 효율 변화를 나타내어, 0.5 mg/L 이하의 방류 수질을 요구할 경우, Al/P비를 2.5정도로 유지하여야 하는 것으로 사료된다. T-P로서 동일한 Al/P비를 2.5로 유지하더라도, pH변화에 따라 제거 효율면에서도 차이를 보였는데, 이는 다음 절에서 상세히 검토되었다.

3.4. 인 제거 특성

Alum 주입량 변화에 따른 T-P제거율 변화를 Fig. 6에 표시하였다. Al/P비가 1.5와 2에서는 각각 1.5시간 경과 후 최대 85.5%와 93.3%의 제거율을 나타냈으나, 점차 감소하기 시작하여 대략 8시간 경과 후에는 약 70%까지 제거율이 감소하였고, 24시간이 경과하면서 최종적으로 각각 55.3%와 54.7%까지 감소하였다. Al/P비가 2.5의 경우, alum 주입 2시간 경과 후 약 90%이상의 제거율을 나타내면서 8시간 정도 유지하다가, 최종적으로는 62.7%까지 감소하였다. 일일 혼합시료를 채취하여 분석한 평균 인 제거율은 Al/P비가 1.5, 2 및 2.5로 증가할수록 각각 65.2%, 69.2% 및 85.2%를 나타냈다.

Al/P비가 2.5에서 최대 인 제거율을 나타냈으나, Al/P비 1.5와 2와 비교하여 pH가 낮은 것으로 관찰되었다.

Al/P비를 2.5로 고정한 후, alum 주입직후의 pH를 HCl을

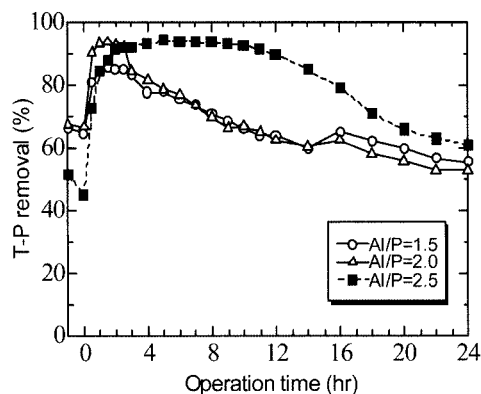


Fig. 6. Profile of T-P removal efficiency at different ratio of alum dosage.

Table 2. Efficiencies in each operating conditions

Run	Al/P	pH	MLVSS (mg/L)	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	T-N rem. (%)	T-P	
								Eff.(mg/L)	Rem.(%)
1	-	7.3	5,700	2.8	4.3	0.8	40.4	3.6	28.4
2-1	1.5	7.0	5,300	1.9	5.2	0.5	38.8	1.7	65.2
2-2	2.0	6.9	5,600	1.4	3.6	0.9	37.6	1.5	69.2
2-3	2.5	5.3	6,900	0.5	2.2	0.1	42.7	0.3	93.8
2-4	2.5	6.1	5,500	1.5	3.4	0.3	45.3	0.9	81.9
2-5	2.5	7.3	5,800	1.7	5.1	0.2	41.8	1.5	70.7

이용하여 4.8, 5.1 및 5.7로 설정했을 때 인 제거에 미치는 pH의 영향을 평가하였다. Fig. 7에 나타낸 바와 같이 alum 주입후의 pH가 4.8에서는 주입시부터 T-P 제거율이 80% 이상을 나타내다가, 최고 96.9%를 정점으로 하면서 24시간이 경과하여도 86.9%까지 높게 나타났다. 90%이상의 제거율을 20시간 이상 동안 유지 가능하였다. 설정 pH조건에서 혼합 시료를 채취한 후의 T-P제거율은 각각 93.8%, 82.0% 및 59.7%로 나타날 정도로 응집 침전법에서와 같이 pH의 영향을 받는 것으로 나타나기 때문에, 이에 대한 조정이 필요할 것으로 사료된다.

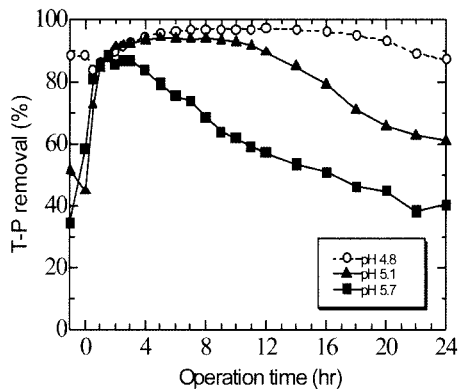


Fig. 7. Profile of T-P removal efficiency at different pH range (Al/P=2.5).

본 연구에서 사용한 alum은 매일 일정량을 한꺼번에 주입하였으므로, Al/P의 비를 2.5로 고정된 후, alum 주입량에 따른 pH의 변화를 검토하였다. Fig. 8에 표시한 바와 같이 alum 주입전의 pH는 각각 5.4, 6.6 및 7.3을 나타내다가, alum 주입과 동시에 각각 4.8, 5.1 및 5.7까지 감소한 후, 점차로 증가하여 24시간이 경과한 시점에서의 pH는 각각 5.3, 6.1 및 7.2로 나타났다.

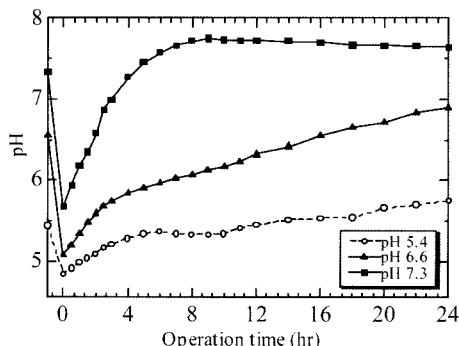


Fig. 8. Daily pH monitoring at different initial pH range (Al/P=2.5).

4. 결론

응집제로서 alum을 주입하면서 운전한 메쉬 침지 여과분리형 생물반응조의 여과분리 특성과 수처리 및 인 제거 특성은 다음과 같다.

1. 응집-여과분리형 생물반응조의 적정 alum 주입량을 산정하기 위하여 Jar-test를 실시한 결과, 0.5 mg/L 이하의 90% 인 제거 효율을 얻기 위해서는 Al/P(mol비)가 2.0 이상은 유지되어야 하는 것으로 나타났다.
2. 전체 85일간의 여과분리를 실시하였는데, alum을 주입하지 않은 반응조에서는 두 차례에 걸쳐 막 폐색이 발생하였으나, alum을 주입한 경우에는 막 폐색없이 5 mm 이하의 안정된 수두차를 유지하면서 0.7 m/d의 투과 유속을 지속적으로 확보할 수 있었다.
3. Alum 주입 여부에 관계없이 여과수의 SS와 BOD는 각각 3과 6 mg/L 이하로 낮게 나타났으며, BOD 제거 효율이 97.4~98.9%였고, alum을 주입한 경우 슬러지 케이크층이 보다 안정되게 형성되어 SS가 2 mg/L 이하의 여과수를 나타냈다. 또한 T-N 제거율은 40% 전후를 유지하였다.
4. Al/P비가 2.5의 경우, alum 주입 2시간 경과 후 약 90% 이상의 제거율을 나타내면서 8시간 정도 유지하다가 최종적으로는 62.7%까지 감소하였지만, 일일 혼합시료를 채취하여 분석한 평균 제거율은 85.2%를 나타냈다.
5. 본 시스템은 초기 pH의 변화에 따라 전체 인 제거 효율에 영향을 미치고 있으므로 이에 대한 조정이 필요하다.
6. 응집-여과분리형 생물반응조에서는 인 성분의 화학적 제거뿐만 아니라, 여과분리 특성으로 유출수질 향상의 효과도 기대할 수 있었다.

참고문헌

- 김규진, 윤성훈, Membrane bioreactor(MBR)를 이용한 오·폐수 처리, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **12**(3), pp. 239-248 (2001).
- 노성희, 김선일, 응집제 첨가 활성슬러지법과 침지형 막분리의 혼성공정에 의한 폐수처리에 관한 연구, *응용화학*, **7**(2), pp. 599-602 (2003).
- 문성용, 김성현, 윤조희, 모형 플랜트 규모 응집-한외여과막 공정에서 막오염에 관한 연구, *대한환경공학회 춘계학술연구발표회논문집*, pp. 328-333 (2003).
- 박재로, 김응호, 침지형막분리법과 응집제첨가활성슬러지법의 조합에 의한 하수중의 유기물 및 인제거 특성에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **16**(3), pp. 401-411 (2000).
- 박재로, 임현만, 김응호, 2단형 막분리 활성슬러지법(Two Stage MBR)에서 내부순환율 변화와 응집제 첨가에 의한 질소 및 인제거 특성에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **18**(2), pp. 131-140 (2002).
- 정용준, 민경석, 남광현, Mesh를 이용한 침지여과분리형 생물반응조의 하수처리, *한국물환경학회지*, **16**(1), pp. 121-131 (2000).
- 정용준, 민경석, 간헐폭기 Mesh 침지여과분리법을 이용한 하수처리와 운전 안정성, *대한환경공학회지*, **23**(1), pp. 13-20 (2001).
- 최승휴, 조남운, 한명수, 응집제를 활용한 막일체형 고도처리공정에 의한 인과 질소의 제거 효과, *대한환경공학회지*, **26**(2), pp. 160-167 (2004).
- 환경부, *수질오염공정시험법*, 동화기술, 서울 (1998).

- Howell, J. A., Chua, H. C. and Arnot, T. C., In Situ Manipulation of Critical Flux in a Submerged Membrane Bioreactor using Variable Aeration Rates, and Effects of Membrane History, *J. Memb. Sci.*, **242**(1-2), pp. 13-19 (2004).
- Kiso, Y., Jung, Y-J., Ichinari, T., Park, M., Kitao, T., Nishimura, K. and Min, K-S., Wastewater Treatment Performance of a Filtration Bio-reactor Equipped with a Mesh as a Filter Media, *Water Res.*, **34**(17), pp. 4143-4150 (2000).
- Liu, R., Huang, X., Chen, L., Wen, X. and Qian, Y., Operational Performance of a Submerged Membrane Bioreactor for Reclamation of Bath Wastewater, *Process Biochemistry*, **40**(1), pp. 125-130 (2005).
- Spatzierer, G., Ludwig, G. and Matsche, N., Biological Phosphorus Removal in Combination with Simultaneous Precipitation, *Wat. Sci. Tech.*, **17**, pp. 163-176 (1985).
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, American Public Health Association, AWWA, WEF, Washington DC. USA (1998).
- Ueda, T., Hata, K., Kikuoka, Y. and Seino, O., Effects of Aeration on Suction Pressure in a Submerged Membrane Bioreactor, *Water Res.*, **31**(3), pp. 489-494 (1997).
- Yoon, T. I., Lee, H. S. and Kim, C. G., Comparison of Pilot Scale Performances Between Membrane Bioreactor and Hybrid Conventional Wastewater Treatment Systems, *J. Memb. Sci.*, **242**(1-2), pp. 5-12 (2004).