

일체형 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과장치를 이용한 하수처리장 반류수 내 고농도 인 및 부유물질 처리

김정숙 · 김민호 · 김미란* · 장정국†

동서대학교 에너지환경공학전공
47011 부산광역시 사상구 주례로 47
***(주)케이이피

46078 부산광역시 기장군 기장을 죽성로 282-1

(2017년 6월 19일 접수, 2017년 7월 16일 수정본 접수, 2017년 7월 18일 채택)

Treatment of Phosphorus and Suspended Solid in Reject Water of Sewage Using an Integrated Slow Mixing/Sedimentation and Net Fit Fiber Filtration System

Jeongsook Kim, Min-Ho Kim, Mi-Ran Kim* and Jeong-Gook Jang†

Division of Energy & Bio Engineering, Dongseo University, 47, Jurye-ro, Sasang-gu, Busan, 47011, Korea

*KEEP Co., LTD, 282-1, Juksung-ro, Gijang-eup, Gijang, Busan, 46078, Korea

(Received 19 June 2017; Received in revised form 16 July 2017; accepted 18 July 2017)

요 약

하수 및 폐수 내 고농도의 인 및 부유물질 제거를 위해 개발한 일체형 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 이용하여 하수처리장의 반류수 내 부유성 고형물 및 인 처리에 적용했을 경우에 따른 성능을 검토하고자 하였다. 6가지 Mode로 실험을 하였으며, 16.7, 33.3, 41.7 및 50.0 ton/day 유량과 Al/P 몰비 2~4의 조건에서 실험을 행하였다. 응집제를 주입하였을 경우에 모두 높은 총인(T-P) 제거 효율을 보였지만 연속운전시간이 7.8 min~11.4 min으로 짧아지는 단점이 생겼다. 이를 극복하기 위해 일체형 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 응집/급속교반/공기주입/완속교반/침전공정 및 여과공정으로 진행 시 연속운전시간이 88.2 min으로 다른 모드로 운전한 결과에 비해 8~11.3배 정도 증가하였다. 역세수량율도 5.4%로 매우 낮게 나타남에 따라 이 공정이 가장 효율적인 처리방안으로 평가되었다.

Abstract – An integrated slow mixing/sedimentation and net fit fiber filtration system has been developed to reduce the high concentrations of suspended solid (SS) and total phosphorus (T-P) in the reject water from sewage/wastewater. A filtration device used in this experiment consists of coagulation, in-line mixing, air injection, slow mixing/sedimentation, and filtration processes. The performance test using this device was carried out with six operational modes for reject water from sewage treatment plant. Experimental conditions used were 16.7, 33.3, 41.7 and 50.0 ton/day of flow rate and 2~4 of Al/P molar ratio. By injection of coagulant in each operational mode, the high removal efficiencies of SS and T-P were obtained, but continuous operation time was decreased to 7.8~11.4 min in most modes. However, when the Mode 5 of the developed filtration device was applied, the continuous operation time was maintained up to 88.2 min. Also, it was found that the continuous operation time in the Mode 5 using the developed system was increased from 8 to 11.3 times longer than those in other modes. Backwashing flow rate was also very low at 5.4% of total filtered water. Therefore, it can be concluded that the Mode 5 of the developed filtration system was the most efficient treatment method for the removal of high concentrations of SS and T-P.

Key words: Slow mixing/precipitation, Net fit fiber filtration, T-P removal, Al/P molar ratio, Backwashing rate

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jgjang@gdsu.dongseo.ac.kr

‡이 논문은 부경대학교 이재근 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

1. 서론

4대강 사업 후 조류의 대발생은 연례행사가 되었다. 영양염류가 이미 풍부한 4대강이 보로 인하여 물이 정체되어 있으므로 여름철 수온이 올라가기 시작하면 녹조 발생은 피할 수 없는 상황이다[1]. 이러한 조류발생의 주요 원인물질은 인과 질소로 알려져 있다[2]. 인은 질소와 다르게 대기로부터 유입이 없기 때문에 조류발생에 질소보다 더 큰 영향인자가 된다[3]. 녹조 발생을 줄이기 위한 인의 제거는 질소 제어보다 상대적으로 용이하여[4] 인의 제거에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 수중에 함유된 인은 화학적, 생물학적 또는 물리화학적 방법에 의해 처리될 수 있는데 철염, 알루미늄염 또는 석회 등을 사용하는 물리화학적 응집 침전방법이 인 제거에 많이 활용되고 있다[5].

한편, 2011년 10월부터 시행되는 개정된 하수도법 시행규칙[6]에 따라 방류수 수질기준 중 인 농도가 2 mg/L에서 0.2 mg/L로 강화되었다. 하수처리장에서 생물학적인 고도처리를 이용하여 인을 제거하는 것은 한계가 있으며, 계절에 따른 미생물의 활동성도 온도에 따른 영향이 심하여 인의 처리는 어려운 실정이다[7]. 반면에 물리화학적 처리공정은 높은 제거율과 유입수질의 변동에 능동적으로 대처할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에[8,9] 병행하여 사용하고 있다.

인의 물리화학적 제거기작은 3가 금속이온이 폐수 중의 3가 인산이온과 화학적으로 반응하여 생성한 난수용성 인산염을 물리적 처리를 행하여 제거한다[10]. 이러한 현재의 물리화학적 인 처리공정은 넓은 부지와 과도한 약품비가 소요된다는 단점이 있기 때문에 보다 작은 공간에서 우수한 제거성을 발휘할 수 있는 기술의 개발이 필요한 실정이다.

폐수의 고도처리 기술 중 물리화학적 방법인 응집·여과기술은 다른 기술에 비하여 운전이 비교적 간단하고 시설 및 유지관리비가 저렴하여 다른 처리와 연계하여 사용할 경우 타 시설의 성능을 향상시키고 유지관리를 용이하게 해 줄 수 있어 매우 광범위하게 적용될 수 있는 기술이다[11].

여과기술 중 섬유여과기술은 모래여과에 비해 0.5 μm의 작은 입경의 물질도 높은 효율로 제거 할 뿐만 아니라 응집기술과 연계하여 행할 경우 수중 인 및 부유물질 제어성능도 크게 향상시키는 특징이 있다[12,13]. 본 연구에서 사용한 그물망 압착식 섬유여과기술은 섬유여체를 직접 인장하고 압착하는 기존 여과장치와는 달리 섬유여체 외측의 그물망을 인장하여 섬유여체를 압착하는 방식으로 동력이 적게 소요되는 장점이 있다. 또한 여과 중 섬유여체가 벌어지는 현상을 방지할 수 있어 높은 여과효율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 그물망을 이완·수축하면서 물과 공기로 역세를 행하기 때문에 장기간 운전 시에도 높은 역세효율 및 여과지속시간을 유지하고 있다.

따라서 본 연구는 고농도의 인 및 부유물질을 함유한 하·폐수를 처리하기 위하여 완속교반침전조와 그물망 압착식 섬유여과기를 연계한 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 개발하고 연속 운전을 통한 최적 운전 방안을 제시하는 것이 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

고농도의 인과 부유물질을 함유한 하·폐수를 처리하기 위한 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 개발하고자 우선 실험



Fig. 1. Pilot-scale of integrated slow mixing/sedimentation and net fit fiber filtration system.

실 규모의 처리장치를 아크릴을 이용하여 제작하였다. 실험실 규모의 장치에서 얻어진 결과를 바탕으로 50 ton/day급 일체형 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 설계·제작하여 B시 G 하수처리장에 설치하여 고농도 인 및 부유물질을 함유한 반류수를 대상으로 그 성능을 평가하였다. 본 시스템은 Fig. 1과 같으며 응집/침전 반응공정과 중력식 그물망 압착식 섬유여과공정으로 구성되어 있다.

2-2. 실험방법

대상 원수 내 인 제거를 위한 적절한 응집제 양을 결정하기 위해 Jar Test를 실시하였으며, 응집제는 우수한 응집성이 있는 것으로 알려진[14] PACl (polyaluminum chloride)을 사용하였다. 실험에 사용한 PACl (Al 17%, 비중 1.37)의 Al/P 몰 비는 2.0~4.0이 되도록 투입하였다. Jar Test는 250 rpm ($G=550 \text{ sec}^{-1}$)으로 1 min 급속혼합과 30 rpm ($G=22 \text{ sec}^{-1}$)으로 30 min 완속혼합 후 30 min의 침전시간을 유지하였다. 30 min의 침전 후 상정액을 채취하여 총인과 부유물질 등을 분석하였다.

Pilot-scale에서는 급속혼합을 위해 in-line mixer를 사용하였으며, 응집제는 정량펌프를 이용하여 투입하였다. Pilot-scale 장치는 완속

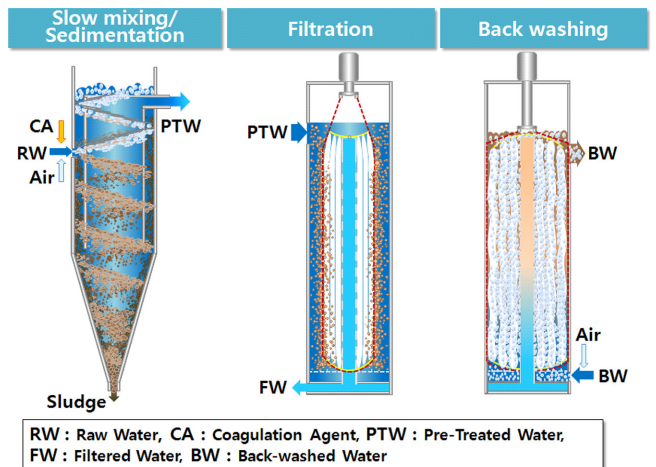


Fig. 2. Flow diagram of slow mixing/sedimentation, filtration and back washing process.

Table 1. Experimental conditions

Operation mode			Sequence of operation	
Mode 1	Reject water	→		Fiber filtration
Mode 2	Reject water	→	Slow mixing/Sedimentation →	Fiber filtration
Mode 3	Reject water	→	Coagulant(In-line mixing) →	Fiber filtration
Mode 4	Reject water	→	Coagulant(In-line mixing) → Slow mixing/Sedimentation →	Fiber filtration
Mode 5	Reject water	→	Coagulant(In-line mixing) → Air injection/Slow mixing/Sedimentation →	Fiber filtration
Mode 6	Reject water	→	Coagulant* → Air injection/Slow mixing/Sedimentation →	Fiber filtration

*Coagulant was rapidly mixed by injected air instead of In-line mixer

교반/침전공정, 여과공정 및 역세공정으로 구분하여 운전하였으며 모식도는 Fig. 2와 같다. 그물망 압착식 섬유여과 장치에 사용한 여과용 섬유는 나일론 BCF (Bulked Continuous Filament) 가공사를 사용하여 제작하였으며 역세는 역세수와 공기를 동시에 사용하였다.

수질분석은 수질오염 공정시험기준에 따라 총인은 자외선/가시선 분광법으로 측정하였으며, 과황산칼륨 용액을 사용하여 시료를 산화시킨 후 추출된 정인산 이온(orthophosphate ion, PO_4^{3-})은 아스코르빈산 환원법을 이용하여 측정하였다. 부유물질의 분석은 일정량의 시료를 유리섬유 여과지(CF/C)로 여과시킨 다음 항량으로 건조한 후 유리섬유 여과지의 무게차로 측정하였다.

반류수 내 총인 및 부유물질 제거특성을 파악하기 위한 성능 테스트는 본 연구자들에 의해 개발된 일체형 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과장치를 이용하였으며, 장치의 성능을 파악하기 위해 동일 장치에서 각 공정의 연계방법을 달리하여 실험단계를 6 단계로 나누어 실험을 행하였다. 각 실험단계는 Table 1과 같다. Mode 1과 Mode 2는 응집제를 주입하지 않고 실험을 행한 것으로서 Mode 1은 그물망 압착식 섬유여과만의 성능을 평가하였고, Mode 2는 섬유여과장치 전 단계에 완속교반/침전조를 설치하여 성능을 평가한 것이다. Mode 3~Mode 6은 응집제를 주입하면서 실험을 행한 것이다. Mode 3은 in-line mixer를 통하여 응집제를 주입 한 후 섬유여과를 통과하는 경우에 대한 장치의 성능을 평가하였다. Mode 4는 in-line mixer를 이용한 급속교반 후 완속교반/침전단계를 거친 후 섬유여과를 행한 실험이다. Mode 5는 Mode 4와 동일한 조건에서 완속교반/침전조에 원수가 유입될 시 유입수의 높은 유속이 유지될 수 있도록 공기를 함께 유입시키면서 실험을 행한 것이며, Mode 6은 Mode 5와 동일한 조건에서 유입되는 공기에 의한 급속혼합 정도를 평가하기 위하여 in-line mixer를 사용하지 않고 실험을 행하였다.

일반적으로 하수처리 방류수의 경우는 역세시간을 2~3 min 정도로 운전하고 있다. 그러나 본 연구에서의 역세시간은 연속실험을 행한 후 모두 5 min으로 동일하게 유지하였다. 역세수량율은 운전시간인 여과지속시간과 역세시간을 합한 시간에 대한 역세시간의 비율을 의미하는 것으로 표현할 수 있다. 따라서 역세시간을 짧게 하는 것은 역세수량율을 낮출 수 있다. 그러나 반류수의 경우 응집제 주입량이 많고 부유물질 농도가 높아 섬유여과장치의 장기운전을 위해서는 섬유의 역세시간을 늘일 필요가 있어 5 min으로 하였다.

3. 실험결과

3-1. 응집제 주입농도 결정

Table 2와 Fig. 3은 PACl의 Al/P의 몰 비에 따른 총인(T-P, Total Phosphorus)의 제거정도를 나타낸 것이다. 인의 제거효율은 응집제

Table 2. Results for T-P removal tests according to Al/P molar ratio

Initial T-P 20.84 mg/L	Al/P molar ratio				
	2	2.5	3	3.5	4
T-P Concentration (mg/L)	15.23	10.48	5.84	5.20	4.74
Removal Efficiency (%)	26.9	49.7	72.0	75.0	77.3

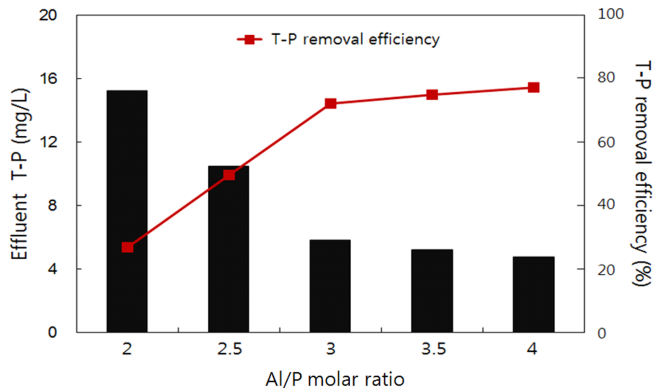


Fig. 3. Variation of effluent concentration and removal efficiency of T-P in jar test (Initial T-P concentration=20.84 mg/L).

주입량, 즉 Al/P의 몰 비를 증가시킬수록 증가하였으며, Al/P의 몰 비가 2.0~4.0의 범위에서 총인의 제거효율은 26.9~77.3%인 것으로 나타났다. 인 제거는 일정한 Al/P 몰 비 이상으로 주입을 하여도 크게 변동하지 않았는데 과도한 응집제 주입은 Al 응집제에 의하여 형성된 침전성 인($AlPO_4(s)$)의 미세 플러 형성에 의해 침전성이 나빠지는 결과를 초래하기도 한다. 따라서 처리수내에 매우 저농도의 인을 유지하기 위해서는 미세 플러의 유출을 막기 위한 여과공정이 필요한 것으로 판단된다. Jar Test 결과 Al/P 몰 비를 3으로 운전하는 것이 가장 경제적인 것으로 판단되어 현장실험에서도 이에 준하여 Al/P 몰 비를 선정하였다.

3-2. 유입수 특성분석

본 연구에서는 고농도 인 및 부유물질을 함유한 B시 G 하수처리장의 반류수를 사용하였으며, B시 G 하수처리장의 전체 반류수는 원심농축여액, 탈리여액 및 중력농축여액으로 구성되어 있다. 본 연구를 수행하는 동안 2014년 10월부터 2015년 9월까지 매월 2~3회 반류수의 총인 및 부유물질을 실측하였다.

Table 3은 반류수 중 원심농축여액의 수질을 2~3회 실측한 결과이며 Fig. 4는 원심농축여액의 실측 총인 및 부유물질 월별 평균농도 변화를 나타낸 것이다. 조사기간 동안의 원심농축여액의 총인 및 부유물질 평균농도는 각각 7.5~49.5 (평균 22.4) mg/L, 136.0~2,452.3 (평균 725.9) mg/L로 나타났다. 농축여액의 총인 및 부유물질 농도

Table 3. Measured data of centrifugal thickening supernatant in G sewage treatment plant

Operation Date	Concentration (mg/L)	
	T-P	SS
2014. 10.	32.7, 17.9	1,117.0, 450.0
2014. 11.	49.5, 29.8	1,952.4, 621.0
2014. 12.	19.2, 25.7	418.5, 1,773.0
2015. 1.	25.5, 45.5, 22.3	2,452.3, 1,852.4, 510.2
2015. 2.	28.5, 23.4, 20.1	725.8, 658.0, 1298.0
2015. 3.	29.5, 27.8	789.0, 286.0
2015. 4.	23.6, 18.9	650.0, 720.0
2015. 5.	17.5, 27.6	315.0, 280.0
2015. 6.	13.5, 12.6	220.0, 198.0
2015. 7.	15.6, 12.5	287.0, 260.0
2015. 8.	10.2, 7.5	210.5, 195.5
2015. 9.	12.5, 13.8	185.0, 136.0
Average	22.4	725.9

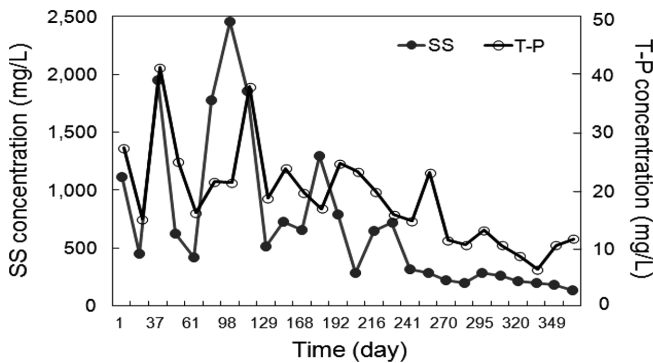


Fig. 4. Variation of SS and T-P concentration in centrifugal thickening supernatant of G sewage treatment plant.

가 각각 41.3~48.2 mg/L, 526~585 mg/L로 발표한 Seo[15]의 연구 결과와 비교하면 본 연구에서의 총인 농도는 약간 낮으나 부유물질 농도는 훨씬 높게 나타났다. 일반적으로 반류수는 하수처리장의 운영 상태에 따라 변동이 큰 것으로 나타나고 있으며 발생한 반류수는 하수처리장 유입수와 합류하여 처리를 행함으로써 하수처리장의 유입 부하에 큰 영향을 미치는 인자라고 판단되고 있다[14]. 하수는 수질 항목사이에 밀접한 상관관계가 있지만, 반류수의 경우에는 수질 항목간의 상관관계가 낮은 것으로 평가되는데, 이는 하수처리장 운전상태 및 농축조와 탈수조 찌거기의 방출 여부에 따라 유기물, 무기물의 비율이 다르게 혼입되기 때문에 수질 변동이 심하고 수질 항목간의 상관성도 낮은 것으로 생각된다.

3-3. Mode별 운전 특성

B시 G 하수처리장의 원심농축여액을 대상으로 본 연구자들에 의해 개발된 일체형 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과 장치의 성능을 파악하기 위해 실험단계를 6 단계로 구분하여 실시하였다. 본 연구를 진행하는 동안 유입 원수의 수질은 계속 변화하였으며, 유량 16.7~50.0 ton/day, 응집제 주입농도를 A/P 2.0~4.0인 조건으로 실험을 행하였으며, 그 중 유량 50 ton/day, A/P 3인 조건에서의 결과를 상호 비교하여 성능 평가를 하고자 하였다.

Table 4는 유량 50 ton/day, A/P 3인 조건에서 각 Mode에서의 운전 특성을 비교한 것이다. 본 연구 기간동안 대상 원수의 총인 및 부유물질 유입 농도가 각각 25.23~38.02 mg/L, 129~232 mg/L 범위로 나타났다.

Table 4에서 보는 바와 같이 Mode 1은 응집제를 주입하지 않고 고농도의 인 및 부유물질을 함유하고 있는 대상 원수를 직접 섬유여과기로만 여과를 행한 실험 결과이다. 섬유여과 처리수의 총인 및 부유물질 농도는 각각 32.15 mg/L, 58.0mg/L로 나타났으며, 처리효율은 각각 3.7%, 69.8%로 나타났다. 따라서 섬유여과 장치만으로는 반류수 중에 함유되어 인의 처리는 거의 일어나지 않고 있음을 알 수 있다. 그리고 약 70%의 부유물질 제거효율을 보이고는 있지만 여과 지속시간은 90.2 min으로 일반적인 하수 방류수 처리 시의 여과 지속시간인 240~360 min에 비해 훨씬 낮게 나타났다. 이는 원수의 부유물질 농도가 192 mg/L로 일반적으로 10 mg/L 이하인 방류수의 수질보다 훨씬 높기 때문에 나타난 결과이다.

Mode 2는 응집제를 주입하지 않고 대상 원수를 완속교반/침전조를 통과시킨 후 섬유여과한 실험으로 원수의 부유물질 유입농도가 129 mg/L로 Mode 1의 결과보다는 낮고 완속교반/침전조에서의 입자 분리효과에 의해 부유물질 제거효율이 75.4%로 증가하면서 여과지속 시간은 195.1 min으로 증가하였다. 부유물질의 제거효율 향상과 함께 총인의 처리효율도 16.3%로 증가하였다. 역세수량율은 Mode 1과 Mode 2에서 각각 5.25% 및 2.50%로 낮게 나타났다.

Table 4에 나타난 Mode 3~6은 유량 50 ton/day, A/P 3인 조건으로 실험한 결과이며, 응집제를 주입함에 따라 총인의 제거효율은 모두 90.3% 이상으로 높게 나타났다. 그러나 원수와 함께 공기를 주입한 Mode 5를 제외하면 여과지속시간은 모두 11.4 min 이하로 감소하고 역세수량율은 급격히 증가하여 모두 30%를 상회하는 결과를 보였다. 이는 응집제를 주입함에 따라 급속교반 및 완속교반/침전조를 통과하면서 인과 미세 부유물질의 플록이 증가하면서 일부 완속교반/침전조에서 입자분리가 일어남에도 불구하고 섬유여과기로 유입되는 부유물질 농도가 231~483 mg/L로 원수 유입수 농도 145~232 mg/L 보다 훨씬 높게 나타나기 때문이다. 그러나 원수와 함께 공기를 주입한 Mode 5의 경우 여과지속시간은 88.2 min로 증가하고 역세

Table 4. Summary of operation results with operation mode in pilot-scale plant

Operation Mode	A/P (-)	Influent (mg/L)			Effluent (mg/L)		Efficiency (%)		Operation time (min)	Back washing rate (%)
		T-P ₀	SS ₀	SS ₁ *	T-P _e	SS _e	T-P	SS		
Mode 1	-	33.40	192	-	32.15	58.0	3.7	69.8	90.2	5.25
Mode 2	-	25.23	129	-	21.11	31.7	16.3	75.4	195.1	2.50
Mode 3	3	25.64	232	483	5.48	17.3	78.6	92.5	7.8	39.1
Mode 4	3	31.79	165	291	5.23	12.5	83.5	92.4	11.4	30.5
Mode 5	3	27.40	154	52	2.56	11.5	90.7	92.5	88.2	5.4
Mode 6	3	38.02	145	231	10.35	14.1	72.8	90.3	9.5	34.5

SS₁; SS concentration in effluent of slow mixing/sedimentation tank

수량율은 5.4%로 응집제를 주입하는 다른 Mode 실험에서의 결과보다 매우 감소하여 Mode 1의 결과와 유사한 값을 나타내었다. 이는 원수의 유량은 다른 Mode와 동일하지만 공급되는 공기에 의해 완속교반/침전조로 유입되는 유입속도가 증가하여 원심력에 의한 입자의 분리효과가 증가한 것과 완속교반/침전조 상부로 배출되는 공기에 의해 입자의 부상분리 효과가 부가됨에 따라 섬유여과기로 유입되는 부유물질의 농도는 52 mg/L로 현저하게 감소하였기 때문이다. 특히 Mode 5에서의 공기주입 외에는 동일한 실험조건인 Mode 4에서 여과 지속시간이 11.4 min으로 낮게 나타난 결과는 공기주입에 따른 원심력 및 부상분리에 의한 확실한 입자의 분리효과가 있음을 보여주는 결과이다.

Fig. 5는 유량 50 ton/day인 조건에서 각 Mode에서의 총인 및 부유물질 제거 특성을 비교한 것이다. 최적의 운전조건을 확립하기 위해서는 우선 총인 및 부유물질의 제거 효율이 높게 유지될 수 있는 운전조건을 찾아야 한다. 반류수의 경우 수질의 변동 폭이 크기 때문에 높은 제거 효율을 확보할 수 있는 운전조건으로 운전을 해야만 순간적인 수질 변화에 적절하게 대응할 수 있다. 응집제를 주입할 경우 A/P 물 비를 3으로 고정하여 비교한 것은 앞에서 언급한 바와 같이 A/P 물 비가 3 이상일 때 대부분의 실험에서 적절한 총인 및 부유물질 제거효율을 확보할 수 있었고 때로는 A/P 물 비 4 보다 양호한 결과를 나타냈기 때문에 응집제 주입량을 최소화하는 목적으로 한 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 Mode 1과 2의 부유물질 제거효율은 약 70~75% 정도로 나타났으나, 응집제를 주입하지 않았기 때문에 총인의 제거는 거의 이루어지지 않았다. 응집제를 주입한 Mode 3~6에서는 총인 및 부유물질 제거효율이 각각 78.6%, 90.3% 이상으로 나타났다. 따라서 유량 50 ton/day, A/P 3인 조건에서 총인 및 부유물질의 동시 제거를 위해서는 응집제를 주입한 Mode 3~6 운전방법이 모두 적절하다고 평가할 수 있다. 그러나 시스템의 연속운전을 판단하기 위해서는 총인 및 부유물질 제거와 함께 역세수량을 결정하는 여과지속시간을 반드시 비교하여야 한다.

Fig. 6은 각 Mode에서의 여과지속시간인 운전시간을 비교한 것이다. 여과지속시간을 보면 Mode 2에서의 실험 결과가 195.1 min으로 가장 높게 나타났다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 Mode 2에서의 실험 결과는 Mode 1과 함께 부유물질 제거효율도 높지 않을 뿐만 아니라 총인의 제거도 거의 일어나지 않았기 때문에 인 제거를 위해서는 적절한 운전방법이 될 수 없다. Mode 3~6의 결과에서는 앞의 Fig. 6의 결과에서도 알 수 있듯이 총인 및 부유물질 제거 측면에서는 적절한 운전방법으로 선정할 수 있으나, 여과지속시간을 살

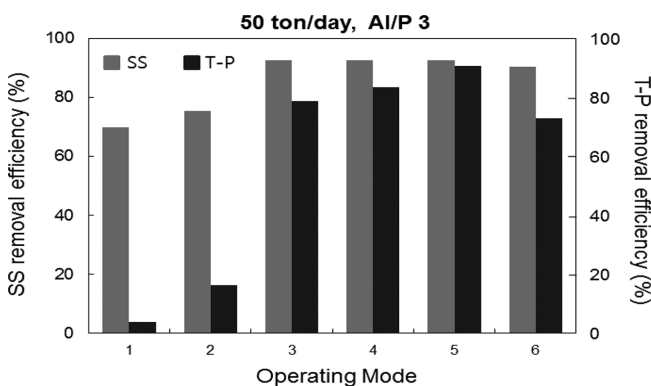


Fig. 5. Variation of removal efficiency with regard to operating mode.

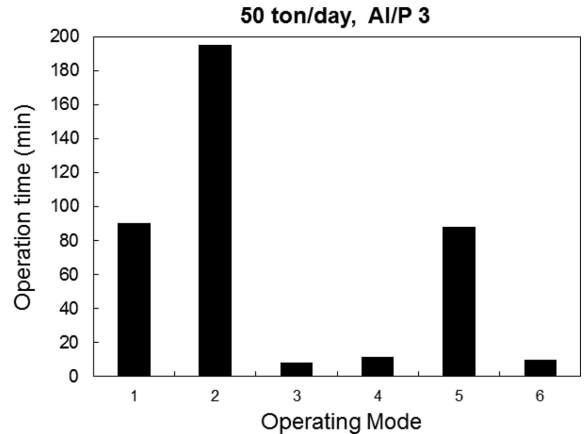


Fig. 6. Variation of continuous operation time according to operating mode.

펴보면 Mode 5를 제외한 Mode 3, 4, 6은 여과지속시간이 7.8~9.5 min으로 매우 짧은 연속운전시간을 나타냄에 따라 적절한 운전방법으로 선정할 수가 없다. Mode 5는 Mode 4에서 부가적으로 원수 유입수에 공기만을 추가적으로 주입한 운전방법으로써 Mode 4에서의 결과와 비교하면 부유물질 제거효율은 92.5%로 Mode 4와 비슷하였으나 총인의 제거효율은 90.7%로 Mode 4의 83.5% 보다 높게 나타났다. 특히 Mode 5의 여과지속시간이 Mode 4의 결과에 비해 8배, Mode 3의 11.3배 정도 증가한 88.2 min으로 나타났다. 이는 부가적으로 공급된 공기에 의해 원수의 유입속도가 증가하여 완속교반/침전조 내에서의 선회강도가 증가하고 이로 인해 입자의 분리효율이 증가함과 동시에 주입공기와 응집제의 급속혼합으로 발생하는 거품에 의한 입자의 부상분리의 효과인 것으로 판단되었다. Mode 6은 in-line mixer 대신 주입되는 공기에 의해 급속교반을 시킨 것으로 총인의 제거효율이 다소 낮게 나타났고, Mode 5와 비교할 시 여과지속시간도 급속히 낮아지는 것을 파악할 수 있었다.

일반적으로 섬유여과장치는 우수한 여과효율은 확보할 수는 있으나 고농도의 인 및 부유물질 제거를 위해서는 섬유여과의 여과지속시간이 너무 짧아 역세수량율이 높기 때문에 고농도의 인 및 부유물질 함유 폐수처리에는 적합하지 못한 것으로 알려져 있다[16]. 그러나 역세수량율을 낮출 수 있는 방안을 모색할 경우 섬유여과의 장점은 그대로 살리면서 기존 인 제거 처리시스템의 대체용으로 매우 효과적일 것이다. 따라서 본 연구에서는 본 연구진에 의해 새로이 개발된 일체형 완속교반/침전조와 섬유여과기를 이용하여 고농도 인 및 부유물질 함유 하·폐수 처리 시 발생할 수 있는 문제점 등을 해소한다면 기존의 인 시스템이 가지고 있는 넓은 부지와 과도한 약품비가 든다는 단점을 보완할 수 있는 기술로 대체될 수 있을 것이다. 따라서 하수처리장의 반류수와 같이 부유물질과 인의 농도가 높은 경우에는 Mode 5와 같은 방법으로 처리할 경우 가장 효율적인 처리방안이 될 것으로 판단된다. 또한 터널공사 또는 건설현장에서 발생하는 고탁도의 건설폐수의 처리에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

하수처리장 반류수 내 고농도의 인 및 부유물질을 처리하기 위해 개발한 「일체형 완속교반/침전 조그물망 압착식 섬유여과시스템」의 성능 평가를 행하여 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구에서의 원수는 하수처리장에서 발생하는 반류수를 사용하였다. 원수로 사용한 하수처리장의 반류수 수질은 총인 및 부유물질 농도가 각각 7.5~49.5 mg/L, 136.0~2,452.3 mg/L로 하수처리장의 운영 상태에 따라 변동이 많은 것으로 나타났다.

(2) Lab scale의 실험에서 얻은 결과를 토대로 제작한 Pilot plant 급 고농도 인 및 부유물질 함유 하·폐수 처리 시스템(50 ton/day)을 설계 및 제작하여 6단계의 운전 Mode별 성능을 평가하였다. 응집제를 주입하지 않은 Mode 1과 2의 부유물질 제거효율은 약 70~75%로 나타났으며 총인의 제거는 거의 이루어지지 않았다. 응집제를 주입한 Mode 3~6에서의 총인 제거효율은 72.8~90.7%, 부유물질 제거효율은 90.3~92.5%로 나타났다.

(3) 고농도의 인 및 부유물질 제거를 위해서는 제거 효율 이외에도 여과지속시간과 역세수량을 반드시 비교하여 평가하여야 한다. 인 및 부유물질 제거효율이 우수한 Mode 3~6의 운전조건에서 여과지속시간과 역세수량을 함께 고려하여 평가한 결과, 완속교반/침전조에서 원수의 유입속도를 증가시킬 목적으로 공기를 부가적으로 주입한 Mode 5의 여과지속시간이 88.2 min으로 Mode 4의 8배, Mode 3의 11.3배로 파악되었으며, 역세수량율은 5.4%로 Mode 3과 4의 30.5% 이상에 비해 매우 낮게 나타남에 따라 Mode 5가 가장 효율적인 처리방안으로 평가되었다.

감 사

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학협력력 기술개발사업(No. C0185720)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- Lee, E. H., Kim, Y., Kim, K. and Kim, S., "Exclusive Correlation Analysis of Algae and Environmental Factors in Weirs of Four Major Rivers in South Korea," *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **49**(2), 155-163(2016).
- Bricker, B. S., Clement, G. C., Pirhalla, E. D., Orlando, S. P. and Farrowl, R. G. D., "National Estuarine Eutrophication Assessment: Effects of Nutrient Enrichment in the Nation's Estuaries," National Oceanic and Atmospheric Administration, **21**, 30(1999).
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A. and Newroth, P. R., "Restoration and Management of lakes and Reservoirs 2nd," Lewis Publishers, Boca Raton, 9-51(1993).
- Hakanson, L., "On the Relationship Between Lake Trophic Level and Lake Sediments," *Water Res.*, **18**(3), 315-318(1984).
- Youn, D. S., "Chemical Removal of Phosphorus from Wastewaters Using Iron Salt," *Graduate School Kyungnam University, Kyungnam, Korea*, 1-70(2012).
- Ministry of Environment, Korea, <http://www.me.go.kr>(2016).
- Han, S. W., Lee, C. H., Lee, J. K. and Kang, L. S., "Effect of the Al(III) Coagulant Basicity on Phosphorus Removal in Sewage Treated Water," *J. KSEE*, **34**(3), 149-154(2012).
- Han, S. W. and Kanf, L. S., "Removal Mechanism of Phosphorus in Wastewater Effluent using Coagulation Process," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **32**(8), 774-779(2010).
- Hwang, E. J. and Cheon, H. C., "High-Rate Phosphorous Removal by PAC (Poly Aluminum Chloride) Coagulation of A₂O Effluent," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(8), 673-678(2009).
- Kim, Y. J., "An Optimization of the Phosphorous Coagulation Dose Ratio for Biologically Treated Sewage Effluent," *Graduate School Honam University, Gwangju, Korea*, 70(2015).
- Yao, K. M., Habibian, M. T. and O'Melia, C. R., "Water and Waste Water Filtration: Concepts and Applications," *Environmental Science & Technology*, **5**(11), 1105-1112(1971).
- Kang, Y. B., Song H. K. and Park T. G., "Filtration Technology for the Effluent of Water Treatment Plant using Twist(PCF)-Filter," *Water Science and Technology*, **12**(3), 55-61(2004).
- Cha, J. H., "Filtration Characteristics and Dnamic Behavior of Fiber Filter," *Graduate School Pusan National University, Busan, Korea*, 92(2007).
- Park, K. Y., Lee, K. and Kim, J., "Manufacture of PAC(Polyaluminum Chloride) by Partial Decomposition of Aluminum Chloride Hexahydrate," *J. Korean Institute Chemical Engineers*, **32**(5), 742-746(1994).
- Seo H. J., "Effect of T-P Load and Reduction Method on Recycle Water in Municipal Wastewater Treatment Plant," *Graduate School Daegu Haany University, Gyeongbuk, Korea*, 67(2011).
- Jang, J. G., Lee, S.H., Park, J.T., Jo, M. C., Kim, M. R. and Kim, J. S., "Development of Pilot Plant Slow Mixing/Sedimentation Net3FM System for Reject Water Treatment from the Side-stream of Wastewater Treatment Plant," *J. Water Treatment*, **22**(2), 89-97(2014).