

일체형 완속교반침전조와 섬유여과기를 이용한 반류수 인 제어시스템의 경제성 연구

김미란* · 김정숙 · 장정국†

동서대학교 에너지생명공학부
47011 부산광역시 사상구 주례로 47
*주케이이피

46078 부산광역시 기장군 기장을 죽성로 282-1
(2017년 6월 19일 접수, 2017년 7월 16일 수정본 접수, 2017년 7월 18일 채택)

Economic Assesment of Phosphorus Control System for Reject Water using a Integral Type Slow Mixing/Sedimentation Tank and Fiber Filter

Mi-Ran Kim*, Jeong-Sook Kim and Jeong-Gook Jang†

Division of Energy and Bio Engineering, Dongseo University, 47, Jurye-ro, Sasang-gu, Busan, 47011, Korea
*KEEP Co., LTD, 282-1, Jukseong-ro, Gijang-eup, Gijang, Busan, 46078, Korea
(Received 19 June 2017; Received in revised form 16 July 2017; accepted 18 July 2017)

요 약

하수처리장에서의 총 인 저감을 위한 방안으로 완속교반/침전 섬유여과시스템을 적용하여 하수 방류수와 반류수를 제어하는 방법에 대해 비교·검토하였다. 물질수지를 통해 인의 최종 농도를 강화된 기준치인 0.2 mg/L로 낮추기 위해서는 약 92.4 kg T-P/day를 제거해야 되는 것으로 분석되었으며, 이를 위한 총 인 제거효율은 하수 방류수는 96%, 반류수(탈수여액)은 69.2% 이상이 되어야 한다. 총 인 제거 목표치를 달성하기 위한 시스템 운영비용을 검토하였으며, 하수방류수를 처리하는 것보다 유량은 적으나 고농도의 인을 함유한 반류수를 처리하는 것이 약품비용은 약 1/2.4, 전력비용은 약 1/120 정도로 절감되는 것으로 나타났다. 한편 반류수 처리를 위해 개발시스템인 완속교반/침전 섬유여과 시스템과 일반적인 응집침전시스템을 적용하는 경우에 대한 경제성을 검토하였으며, 완속교반/침전 섬유여과 시스템이 일반적인 응집침전시스템에 비해 설치면적이 약 1/7로 작고 약품소요량 및 전력비를 포함한 연간운전비용은 약 1/1.7 소요되어 개발시스템이 보다 경제성이 있는 것으로 평가되었다.

Abstract – As a method to reduce the total phosphorus in sewage treatment plant, we applied the integral type slow mixing/sedimentation fiber filtration system to compare the control methods for the sewage effluent and the reject water. It was analyzed that about 92.4 kg T-P/day should be removed in order to satisfy the final concentration of phosphorus of 0.2 mg T-P/L, which is reinforced effluent standard. Therefore the total phosphorus removal efficiency should be 96% for sewage effluent and 69.2% for reject water (dehydrated filtrate) respectively. The system operation cost to achieve the target of total phosphorus removal efficiency was assessed. It has been found that the treatment cost of the reject water containing high concentration of phosphorus with a low flow rate is reduced to about 1/2.4 of the coagulant cost and about 1/120 of the electricity cost, compared to that of the sewage effluent treatment. Also the economics of the integral type slow mixing/sedimentation fiber filtration system and the general coagulation and sedimentation system were compared. It was evaluated that the development system was more economical because the installation area of the integral type slow mixing/sedimentation fiber filtration system was about 1/7 smaller than that of the general coagulation and sedimentation system, and the annual operation cost including the required amount of coagulant and electricity cost of the development system was lowered about 1/1.7 than that of the general system.

Key words: Reject water treatment, Phosphate removal, Integral type slow mixing/sedimentation system, Fiber filter, Coagulation

† 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. 서 론

물 사용량 및 폐수 발생량의 급격한 증가로 인해 수자원 확보 및 관리가 지속적으로 필요하다. 지금까지 환경부에서는 공공수역의 수질개선을 위해 하수처리시설 등의 환경기초시설을 확충하고 방류수 수질기준 규제를 실시하였으며, 용수사용 및 공공수역의 생태계 보전에 중점을 두고 부영양화 생성의 주요인자인 총 인(T-P)과 COD에 대하여 2012년 1월부터 공공하수처리시설 및 폐수종말처리시설의 방류수에 대해 강화된 수질기준을 적용하고 있다[1,2].

그러나 이러한 노력에도 불구하고 우리나라 하천의 총 인 농도는 2014년 5월 기준 평균 0.095 mg/L로 OECD 영양단계 및 단계별 목표 수질 설정 현황에서 부영양단계(0.1~0.035 mg/L)에 해당되며, 하폐수처리장 방류수 내 인의 농도를 더욱 감소시켜야만 하는 실정이다[3~5]. 현재 공공수역의 수질개선을 위해 환경부에서 진행 중인 수질오염총량관리는 3단계로 접어들어 향후 더욱 엄격한 수질관리 방안의 적용을 예고하고 있으며, 공공하수처리시설 및 폐수종말처리시설의 방류수 인에 대한 규제는 지역별로 0.2~0.5 mg/L로 강화된 기준치가 적용되고 있다[2].

인은 생물학적 공정에서 미생물에 흡수되어 침전물의 형태로 제거되나, 미생물에 흡수되는 양에 한계가 있어 대략 1 mg/L를 달성 가능한 최저농도로 보는 것이 일반적이다[6,7]. 입상성 인은 고형물 제거시 0.05 mg/L 이하 수준으로 거의 제거되지만, 인 축적미생물(PAO, phosphorus accumulation organisms)을 이용한 생물학적 인 제거공정이나 화학침전을 이용하는 용존성 인 제거공정에서는 0.1 mg/L 정도가 기술적 한계농도라고 보고되고 있다[8]. 한편 전통적인 생물반응조와 후속되는 침전지에서 달성할 수 있는 총인 방류농도는 0.5~1.0 mg/L 범위로 보고되고 있으며, 2차침전지 이후 3차 처리시설은 제거성능에 따라 0.1 mg/L 이하의 낮은 방류농도를 달성할 수 있는 것으로 보고되고 있다[7].

그러므로 현재 강화된 기준치가 적용되고 있는 하수처리장에서의 총 인 배출량 저감을 위해서는 응집제와 화학적 또는 물리적으로 결합된 침전물의 형태로 제거되는 화학적 처리공정에서 응집-침전 또는 응집-여과설비로 제어하는 것이 유입수질의 변동에 능동적으로 대처가 가능할 뿐만 아니라 저농도의 인을 효과적으로 제어할 수 있을 것이다[9,10]. 그러나 현재의 화학적 인 처리공법은 넓은 부지면적과 많은 양의 응집제를 사용하고 있기 때문에 운전 및 유지비용이 높다. 따라서 현실점에서 보다 작은 공간에서 우수한 제거성능을 발휘할

수 있는 경제적인 인 제거 시스템의 개발이 필요하다.

이를 위해 보다 작은 공간에서 우수한 제거성능을 발휘할 수 있도록 일체형 완속교반침전조와 섬유여과기를 연계한 완속교반/침전 섬유여과시스템을 개발하였으며, 본 시스템은 응집-침전 및 여과공정을 결합함으로써 고농도의 인 및 SS를 동시에 제어하여 보다 낮은 수준의 방류수 인 농도 달성이 가능하다[11,12].

본 연구에서는 개발시스템을 이용하여 하수 방류수 내 총 인 농도를 적정 수준 이하로 제어하는 경우 보다 경제적인 방안을 모색하고자, 하수 방류수를 처리하는 방법과 고농도의 인을 함유하고 있는 반류수를 처리하는 방법에 대한 시스템 경제성을 비교·검토하였다. 또한 총 인 제어를 위해 개발시스템을 운영하는 경우 일반적인 응집-침전 시스템에 비해 경제성을 확보할 수 있는지를 검토하고자 하였다.

2. 연구방법

2-1. 하수처리장 내 총 인 제거량 산정

하수처리장에서의 총 인 배출량 저감을 위해서는 하수 방류수를 처리하는 방법과 고농도의 인을 함유하고 있는 반류수를 처리하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 본 연구에서는 두 가지 방법에 대한 경제성 검토를 통해 하수처리장의 인 제거 측면에서 보다 효과적인 처리 방법을 선정하고자 하였으며, 이를 위해 먼저 G 하수처리장에서의 수량 및 수질자료를 이용하여 계산된 물질수지를 바탕으로 총 인(Total Phosphate, T-P) 제거 목표량을 산정하였다. G 하수처리장은 최초침전지, 생물반응조, 최종침전지, 여과시설 등으로 구성된 수처리시설과 농축조, 소화조, 탈수설비 등으로 구성된 슬러지처리시설을 갖춘 일반적인 형태의 하수처리시설을 운영하고 있다.

G 하수처리장의 물질수지 개념도를 나타낸 Fig. 1에서 보는 바와 같이, G 하수처리장의 반류수 수량은 8,246 m³/day로 처리공정으로의 하수원수 유입수량 375,730 m³/day의 대략 2.19%로 적은 양이지만, 반류수 내 T-P 농도는 평균 33 mg/L로 일반적인 하수유입수 내 T-P 농도에 비해 높은 편이다. 특히 G 하수처리장에서 발생하는 반류수 중 탈수여액의 경우 유량은 1,483 m³/day으로 적은 편이나 T-P 농도는 평균 90 mg/L로 매우 높다.

Table 1과 Table 2에 나타낸 바와 같이 반류수 내 함유된 T-P 농도를 양으로 계산하면 272 kg/day로 하수원수 내 1,561 kg/day의 17.4% 정도이며, 폭기조 유입농도의 14.8% 정도로 높은 비율을 차지한다. 따라서 원수유입수량 대비 반류수의 수량은 2.19%이지만 공정전체의

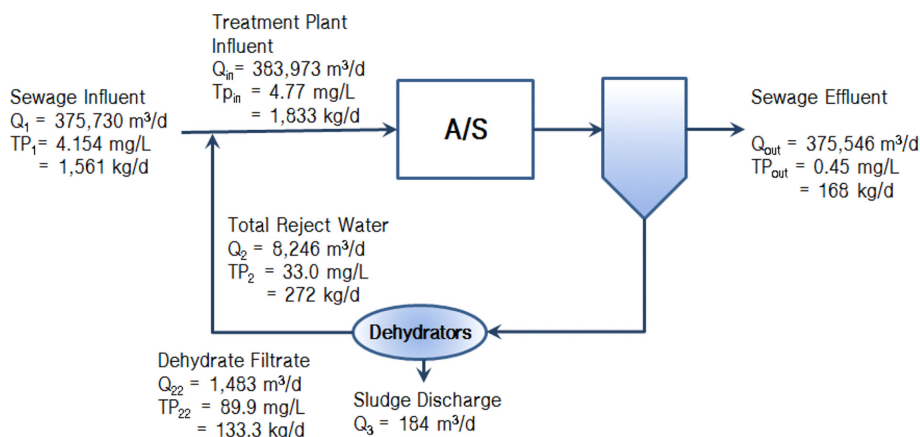


Fig. 1. A concept of mass balance of G sewage treatment plant in Busan.

Table 1. Estimation of removal amount to achieve T-P target water quality in sewage effluent

Sewage influent (m ³ /day)	Inflow		Outflow		T-P target water quality		Removal required amount (kg/day)
	T-P (mg/L)	T-P (kg/day)	T-P (mg/L)	T-P (kg/day)	T-P (mg/L)	T-P (kg/day)	
					0.4	150.3	17.3
375,730	4.154	1,832.8	0.446	167.5	0.3	112.7	54.8
					0.2	75.1	92.4

Table 2. Estimation of T-P removal rate in total reject water to achieve T-P target water quality in sewage effluent

Flow rate of total reject water (m ³ /day)	Inflow		Outflow		Removal efficiency (%)	Removal required amount (kg/day)
	T-P (mg/L)	T-P (kg/day)	T-P (mg/L)	T-P (kg/day)		
			23.10	190.5	30.0	81.64
8,246	33.0	272.1	21.78	179.6	34.0	92.52
			21.45	176.9	35.0	95.24
			19.80	163.3	40.0	108.85

인 유입량으로 계산하면 14.8%로 높은 부분을 차지하므로, 반류수 내 T-P를 일정수준으로 제거하는 것이 하수처리장에서 배출되는 T-P 양을 저감시키는데 효과적인 것으로 판단된다.

한편 하수원수 내 T-P 함량을 기준으로 G 하수처리장에서 현재 0.446 mg/L 수준으로 배출되고 있는 하수방류수의 T-P 농도를 0.2 mg/L로 저감시키기 위해서는 하수처리시설 공정으로 유입되는 T-P의 약 92.4 kgT-P/day를 제거해야 되는 것으로 계산되었으며, 이를 위해서는 방류수 중 T-P의 농도를 저감시키는 방법과 반류수 중 T-P를 제거시키는 방법이 있다.

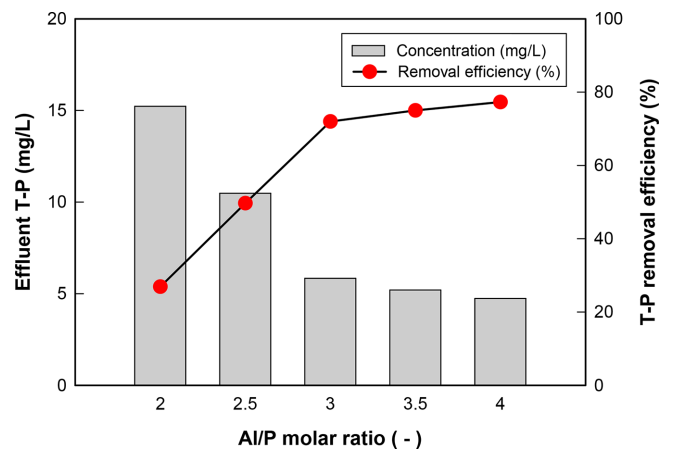
본 연구의 대상인 G 하수처리장 반류수는 원심농축여액, 탈수여액 및 증류농축여액이 유입수 저류조로 합류되도록 되어 있는데, 이 중 탈수여액 내 T-P 농도는 90 mg/L 정도로 15~20 mg/L 정도인 다른 반류수의 T-P 농도에 비해 매우 높은 것으로 분석되었다. 그러므로 본 연구에서는 반류수 중 탈수여액 내 T-P 농도를 저감하는 방안에 대해 검토하였으며, Table 3에 나타낸 바와 같이 탈수여액 내 T-P 농도를 69.2% 이상 저감시킬 경우 하수 방류수의 목표수질을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

2-2. Jar test 및 시스템 운전을 통한 응집제 주입농도 결정

본 연구에서 하수처리장 내 T-P의 저감을 위해 적용한 화학침전법에 대한 경제성 평가시 주요변수 중 하나는 인 제거를 위한 응집제 소요량일 것이다. 본 연구에서는 Jar test 및 개발시스템의 현장에서의 Pilot test 결과를 바탕으로 응집제 주입농도를 선정하고, 이를 경제성 평가에 적용하고자 하였다.

본 연구에 사용된 응집제는 응집성이 우수한 Al 계열의 상업용 PACl (polyaluminum chloride)이며[13], 농도를 희석하여 인의 제거 특성을 검토하였다. 실험에 사용한 PACl의 Al 함량은 17.0% 이고 밀도는 1,370g/L이다. Jar test 및 Pilot test를 위한 응집제 주입량은 Al/P molar ratio가 2.0~4.0 이 되도록 설정하였다.

Jar Test는 1L의 원형 jar와 6개의 패들 형 교반기(Phipps and Bird)를

**Fig. 2. Variations of T-P concentration and removal efficiency according to Al/P molar ratio.**

이용하였으며, 초기 T-P 농도가 20.84 mg/L인 하수 반류수를 대상으로 수행하였다. 급속혼화는 1분간 250 rpm ($G=550 \text{ sec}^{-1}$), 완속혼합은 30분간 30 rpm ($G=22 \text{ sec}^{-1}$), 교반 후 침전시간은 30분으로 유지하였다.

Jar test 결과를 나타낸 Fig. 2에서 보는 바와 같이 응집제 주입량, 즉 Al/P의 몰 비를 증가시킬수록 인의 제거효율은 증가하였으며, Al/P의 몰 비가 2.0~4.0의 범위에서 T-P의 제거효율은 26.9~77.3%인 것으로 나타났다. 그러나 일정 몰 비 이상으로 응집제를 주입하여도 제거효율은 크게 변화되지 않는 것으로 나타났는데, 이는 Al 응집제에 의하여 형성된 침전성 인(예, $\text{AlPO}_4(\text{s})$)의 경우 일부는 플럭 형성에 의하여 침전되지 않았기 때문으로 평가된다. 또한 처리수 내의 인 농도를 매우 저농도로 유지하기 위해서는 별도의 여과공정이 필요한 것으로 판단되었다. 한편 Jar Test 결과 Al/P 몰 비를 3으로 운전하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단되었으며, 현장실험에

Table 3. Estimation of T-P removal rate in dehydrated filtrate to achieve T-P target water quality in sewage effluent

Flow rate of dehydrated filtrate (m ³ /day)	Inflow		Outflow		Removal efficiency (%)	Removal required amount (kg/day)
	T-P (mg/L)	T-P (kg/day)	T-P (mg/L)	T-P (kg/day)		
			31.47	46.7	65.0	86.66
1,483	89.9	133.3	27.69	41.1	69.2	92.26
			26.97	40.0	70.0	93.33
			22.48	33.3	75.0	99.99

Table 4. Field test results of the development system

Flow rate (t/d)	Al/P molar ratio (-)	Influent (mg/L)			Effluent (mg/L)		Efficiency (%)	
		SS ₀	SS ₁	T-P ₀	SS _e	T-P _e	SS	T-P
50.0	2	154	59	27.40	17.6	10.94	90.6	60.1
	3	154	52	27.40	16.1	2.56	92.5	90.7
	4	154	81	27.40	10.5	2.68	93.2	90.2

SS₀: SS concentration of dehydrate filtrate [mg/L]
 SS₁: Effluent SS concentration of the slow mixing/sedimentation system [mg/L]
 SS_e: Effluent SS concentration of fiber filtration system [mg/L]
 T-P₀: T-P concentration of dehydrate filtrate [mg/L]
 T-P_e: Effluent T-P concentration of fiber filtration system [mg/L]

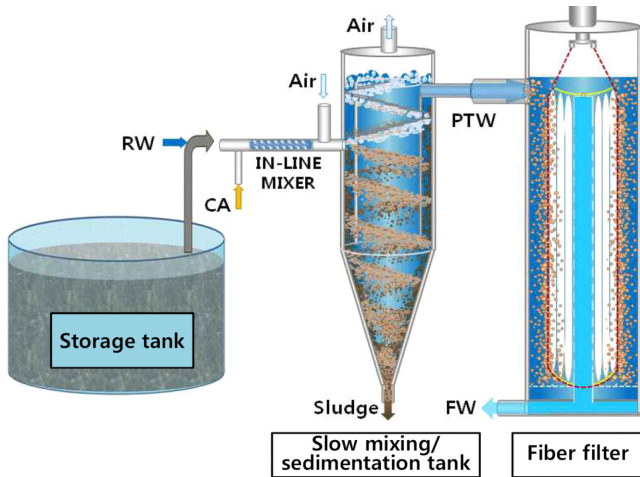


Fig. 3. A schematic diagram of the development system.

서도 이에 준하여 Al/P 몰 비를 선정하였다.

Table 4는 일체형 완속교반침전조와 섬유여과기로 구성된 시스템을 이용한 현장에서의 Pilot test 결과를 나타낸 것이다. 자료에서 보는 바와 같이 현장실험에서도 Al/P 몰 비가 3.0 이상일 때 90% 이상의 높은 T-P 제거율을 얻을 수 있었으며, 응집제 주입량을 더욱 증가시켜도 T-P 제거율의 변화는 거의 없었는데 이는 Jar test 결과와 유사한 것이다.

한편 Table 4에 나타난 자료는 현장에서의 Pilot test 결과를 평균하여 나타낸 것으로 반류수의 SS 및 T-P 유입농도는 각각 123~249 mg/L, 23.98~38.02 mg/L로 다양하였으나, 본 시스템에 의한 오염물질 제거성능은 각 조건별로 유사하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 하수 방류수 및 반류수 내 T-P 농도 저감을 위한 적절한 응집제 주입량은 Al/P 몰 비가 3.0인 것을 기준으로 하였으며, 이를 경제성 평가를 위한 약품비용 계산에 활용하였다.

2-3. 일체형 완속교반침전조 및 섬유여과기를 이용한 반류수 제어 시스템의 경제성 평가 방법

고농도의 T-P 저감을 위해 개발된 시스템은 일체형 완속교반침전조와 그물망 압착식 섬유여과기로 구성되어 있으며, 개발시스템의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다.

일체형 완속교반침전조와 섬유여과기로 구성된 개발시스템에 의한 하수처리장 내 총 인 제거에 대한 경제성 평가는 2단계로 나누어 실시하였다. 먼저 1단계에서는 방류수 내 T-P 농도를 0.2 mg/L 수준으로 저감시키기 위해 개발시스템을 적용하여 Fig. 4에서의 같이 하수처리공정 후단(A)과 탈수조 후단(B)의 반류수를 제어하는 경우에



Fig. 4. Concept diagram of installation point of phosphorus treatment facility in sewage treatment plant.

대해 약품비용과 전력비용을 비교·검토하였으며, 2단계에서는 반류수 내 총 인 성분을 제어하는 경우 일반적인 응집침전시스템과 개발시스템의 설치면적, 약품비용 및 전력비용을 비교하였다. 이때 시스템 운전비용 산정은 G 하수처리장에서 개발시스템 Pilot test 결과를 활용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 반류수 내 인 제거에 따른 경제성 평가

하수처리장에서 총 인 배출량 저감을 위해 하수 방류수를 제어하는 방법(Case 1)과 고농도의 반류수를 제어하는 방법(Case 2)을 고려하였으며, 일체형 완속교반침전조와 섬유여과기로 구성된 처리시스템을 이용하여 T-P를 제어하는 경우에 대한 약품소요량과 전력비 등을 비교함으로써 보다 효과적인 방안을 도출하고자 하였다.

이를 위해 G 하수처리장을 대상으로 하수방류수 내 T-P 농도를 0.2 mg/L 수준으로 저감시키기 위한 인 제거량을 계산하고, 계산된 결과값을 이용하여 시스템 운영비를 살펴보았다.

3-1-1. 하수처리장 내 인 제거를 위한 대상공정별 약품소요량 비교

본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 Fig. 4에 표시한 바와 같이 하수방류수 내 T-P 성분을 제거하는 경우(A)와 반류수 내 T-P 성분을 제거하는 경우(B)에 대한 약품소요량을 비교·검토하였으며, 이를 Table 5에 나타내었다. G 하수처리장에서 배출되는 하수방류수 (375,730 m³/day) 내 T-P 농도는 0.446 mg/L이며, 이를 0.2 mg/L 이하로 저감시키기 위해서는 17% PACl을 응집제로 사용시 약 3.7 ppm 정도 주입하면 되는 것으로 조사되었다. 그러므로 본 연구에서는 17% PACl을 4 ppm 주입시 소요되는 응집제량 및 소요비용을 계산하였으며, 하수방류수의 경우 약 1,097 L/day의 응집제가 필요하며 소요비용은 연간 약 95,997천원인 것으로 나타났다.

한편 G 하수처리장의 총 반류수 중 탈수여액(1,483 m³/day) 내 T-P 농도는 89.9 mg/L였으며, T-P 제거목표치를 달성하기 위해서는 반류수 내 T-P의 69.2% 이상을 제거하여야 되는 것으로 나타났다. 완

Table 5. Comparison of coagulant amount and cost in sewage effluent and reject water treatment systems

Item	CASE 1	CASE 2	Remarks
Target Water	Sewage effluent	Reject water	
Installation Point	A point in Fig. 4	B point in Fig. 4	See Fig. 4
Coagulant Injection Concentration	4 ppm	450 ppm	17% PACI
Daily Coagulant Requirement	1,097 L/day	460 L/day	17% PACI
Annual Coagulant Costs	95,997,100 won/yr	40,241,250 won/yr	Application price 250 won/kg
Annual Coagulant Cost Ratio	Cost ratio of sewage effluent to reject water treatments = 2.39		

속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 이용한 반류수 내 인 제거 실험에서 Al/P 몰 비가 3 이상에서 T-P 제거율이 90% 이상이었으며, 이를 기준으로 17% PACI 주입량을 산정하면 대략 443 ppm 정도이다. 그러므로 본 연구에서는 반류수 중 탈수여액 내 17% PACI를 450 ppm 주입하는 경우 소요되는 응집제량 및 소요비용을 계산하였다. 이때 반류수 유량은 G 하수처리장의 반류수 처리시설 설계용량을 기준으로 1,400 m³/day의 반류수(탈수여액)를 처리하는 것으로 가정하였다.

T-P 농도 저감을 위해 반류수(탈수여액)를 제어하는 경우 약 460 L/day의 응집제가 필요하며, 소요비용은 연간 약 40,241천원인 것으로 나타났다. 이는 방류수 내 T-P를 제거하기 위해 소요되는 약품비의 약 1/2.4에 해당하는 금액으로 T-P 제어를 위해 대량의 하수방류수에 4 ppm의 응집제를 주입하는 것보다 소량의 반류수에 450 ppm의 응집제를 주입하는 것이 하수방류수의 T-P 목표수질을 달성을 위해 소요되는 약품비용의 절감면에서 매우 유리한 것으로 판단되었다.

3-1-2. 하수처리장 내 인 제거를 위한 대상공정별 전력비 비교

하수방류수 및 반류수 내 인 제거를 위해 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 적용할 경우 소요되는 전력비는 크게 Backwash Pump, Backwash Blower, 완속교반/침전조용 Blower 그리고 Compressor의 가동에 의한 것이다.

Table 6은 1일 375,730 m³의 하수방류수 및 1일 1,400 m³의 반류수(탈수여액)를 응집·여과처리할 경우 각 대상공정에 대한 세부 장치에서의 전력사용량과 연간 전력비를 나타낸 것이다. 자료에서 보는 바와 같이 하수방류수 내 인 제거시 완속교반/침전 그물망 압착식

섬유여과시스템에서의 1일 전력사용량은 5,056 kWh이고, 이를 연간 사용되는 전력비로 계산하면 연간 110,726,400원이다. 그리고 반류수(탈수여액) 내 인 제거시 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템에서의 1일 전력사용량은 42.8 kWh이고, 이를 연간 사용되는 전력비로 계산하면 연간 937,320원이다. 본 계산에 적용된 1일 여과/역세 횟수는 실험결과를 바탕으로 산정한 것으로 하수방류수의 경우 1일 5회, 반류수의 경우 1일 15.5회를 적용하였다.

완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 적용하는 대상공정별 전력비 비용 또한 약품비의 경우와 마찬가지로 반류수 처리시 소요되는 전력비가 하수방류수 내 T-P를 제어하는 경우에 비해 1/118 정도로 소요되는 것으로 나타나, 반류수 내 T-P를 효과적으로 제어하는 것이 보다 경제적인 것으로 판단되었다.

3-1-3. 완속교반/침전 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템의 연간 운전비용

본 연구대상인 부산시 G 하수처리장의 방류수 내 T-P 농도를 0.2 mg/L 이하로 낮추기 위해서는 방류수의 인 제거율이 96% 이상이거나, 반류수(탈수여액)의 인 제거율이 69.2% 이상이어야 한다. 그러므로 본 연구에서는 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템을 이용하여 하수방류수 및 탈수여액 내 인 제거율이 각각의 목표제거율 이상으로 얻을 수 있는 조업조건을 기준으로 연간 운전비용을 산정하였다.

하수방류수 및 반류수(탈수여액) 내 인 제거를 위한 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템의 연간 운전비용은 시스템을 운전하는 데 필요한 전력비와 응집공정에 소요되는 연간 약품비용을

Table 6. Comparison of power consumption and electricity cost in sewage effluent and reject water treatment systems

Item	CASE 1	CASE 2	
Reference Power & Usage Time	Backwash pump	978.7 kW, 10 min/day	3.7 kW, 77.5 min/day
	Backwash blower	1739 kW, 10 min/day	17.3 kW, 62 min/day
	Blower	192.4 kW, 1430 min/day	0.87 kW, 1364 min/day
	Compressor	211.5 kW, 5 min/day	1.5 kW, 15.5 min/day
Electricity Consumption by Device	Backwash pump	163.1 kWh/day	4.8 kWh/day
	Backwash blower	289.8 kWh/day	17.8 kWh/day
	Blower	4585.5 kWh/day	19.8 kWh/day
	Compressor	17.6 kWh/day	0.4 kWh/day
Total Power Consumption per Day	5,056 kWh/day	42.8 kWh/day	
Annual Electricity Costs	110,726,400 won/yr	937,320 won/yr	
Annual Electricity Cost Ratio	Cost ratio of sewage effluent to reject water treatments = 118		

Remarks

1. Based on SS 10 mg/L or less in sewage effluent and SS 300 mg/L or less in reject water
2. Coagulant injection concentration: Sewage effluent 4 ppm, reject water 450 ppm (as 17% PACI)
3. Energy charge: Applied for general industrial energy charge (60 won/kWh)
4. Excluding electricity consumption by influent pump (using a gravity fiber filter system)

Table 7. Estimation of annual operating costs

Item	CASE 1	CASE 2
Daily Coagulant Requirement	1,097 L/day	460 L/day
Annual Coagulant Costs	95,997,100 won/yr	40,241,250 won/yr
Total Power Consumption per Day	5,056 kWh/day	42.8 kWh/day
Annual Electricity Costs	110,726,400 won/yr	937,320 won/yr
Annual Operating Costs*	206,723,500 won/yr	41,178,570 won/yr
Annual Operating Costs Ratio	Cost ratio of sewage effluent to reject water treatments = 5.62	

*Operating Costs = Coagulant Costs + Electricity Costs

합하여 산정하면 된다. 본 연구에서는 G 하수처리장에서 발생하는 하수방류수 및 반류수(탈수여액)의 평균 발생량을 기준으로 인 제거용 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유시스템에서의 연간 운전비용을 계산하였으며, 이를 하수방류수 및 반류수(탈수여액) 1 m³ 당 연간 운전경비로 환산하여 Table 7에 나타내었다. Table 7에서 보는 바와 같이 하수방류수 연간 운전비용은 전력비와 약품비를 합하여 206,723,500원이었으며, 반류수 연간 운전비용은 41,178,570원으로 나타났다. 따라서 연간 운전비용을 감안할 때 T-P 제어를 위해 하수처리공정 후단(A) 보다는 탈수조 후단(B)에 그물망 압착식 응집-섬유여과시스템을 설치하여 반류수 내 인을 제어하는 것이 보다 경제적인 것으로 판단되며, G 하수처리장의 경우 탈수조 후단에 150 m³ 정도의 저류조를 별도로 설치하면 본 시스템을 보다 효과적으로 운영할 수 있을 것으로 판단된다.

한편 그물망 압착식 섬유여과기(Net3FM)를 기준으로 한 연간 운전비용은 장치비용 및 섬유교체비가 제외된 것으로 기존 중력식 섬유여과기에 비해 본 개발품의 장치비용 및 섬유교체비용이 낮은 것을 고려하면, 그물망 압착식 섬유여과장치를 반류수 인 제거를 위한 응집-여과시스템으로 활용 시 디스크필터나 타 중력식 섬유여과기를 적용하는 것에 비해 보다 더 경제적인 것으로 판단된다.

3-2. 완속교반침전 섬유여과 시스템 적용에 따른 경제성 검토

일반적으로 적용되고 있는 물리화학적 고농도 인 및 SS 제거기술의 문제점을 개선하여 보다 작은 공간에서 우수한 제거성능을 발휘할 수 있는 완속교반/침전 섬유여과 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템의 하수처리장 현장 적용을 통해 보다 작은 공간에서 우수한 제거성능을 발휘함을 확인할 수 있었다[11,12]. 따라서 본 연구에서는 하수처리장의 반류수 처리를 위한 현장 운전결과를 바탕으로 개발된 완속교반/침전 섬유여과 시스템의 경제성을 평가하고자 한다. 이를 위해 고농도 인 및 SS 제거를 위해 일반적으로 적용되는 기술인 응집침전시스템과 본 시스템의 경제성을 비교하였다.

3-2-1. 시스템 설치면적의 최소화

완속교반/침전 섬유여과시스템은 기존 급속교반, 완속교반, 침전 공정에 적용되는 체류시간에 비해 현저하게 짧은 시간에 고농도 인 및 SS 제거가 가능한 것이 특징이다. 따라서 본 연구에서는 유량 1400 m³/day, T-P 90 mg/L 이하, SS 300 mg/L 이하인 반류수의 처리 시 응집침전시스템과 완속교반/침전 섬유여과시스템의 설치 시 소요되는 부지면적을 검토하였으며, 이를 Table 8에 나타내었다.

Table 8에서 보는 바와 같이 일반적인 응집침전시스템의 경우 체

Table 8. Comparison of design parameters and required site area of general coagulation and sedimentation system and the development system

Item	General coagulation and sedimentation system			Slow mixing/sedimentation fiber filter system			Remarks	
System Configuration	Rapid mixing - Slow mixing - Sedimentation			Slow mixing/sedimentation - Fiber filter				
Design Flow Rate	1400 m ³ /day			1400 m ³ /day				
Residence time	Rapid mixing tank	10 min		Slow mixing/sedimentation tank	15 min			
	Slow mixing tank	30 min						
	Sedimentation tank	70 min		Fiber filter reactor	5 min			
	Sum	110 min		Sum	20 min			
Design Criteria	Rapid mixing tank	D	2.4 m	Slow mixing/sedimentation tank	D	2.0 m	He: Effective height. Actual device height may be higher than He.	
		He	2.15 m		He	4.6 m		
	Device specification	Slow mixing tank	W	2.55 m	Fiber filter reactor	W		1.2 m
			L	4.18 m		L		1.6 m
		Sedimentation tank	He	2.74 m		He		2.5 m
			W	5.2 m		L		5.2 m
	L	5.2 m	He	2.5 m				
	He	2.5 m						
Required Site Area	43.5 m ²			5.9 m ²			Exclude plumbing site	

Table 9. Estimation of coagulant amount and cost for reject water treatment by two systems

Item	General coagulation and sedimentation system	Slow mixing/sedimentation fiber filter system
Coagulant Injection Concentration	750 ppm	450 ppm
Daily Coagulant Requirement	766 L/day	460 L/day
Annual Coagulant Costs	67,032,700 won/yr	40,241,250 won/yr
Annual Coagulant Cost Ratio	Cost ratio of general coagulation and sedimentation system to slow mixing/sedimentation fiber filter system = 1.67	

류시간이 110분 정도임에 비해 완속교반/침전 섬유여과시스템은 20분 정도로 매우 짧은 편이다. 이로 인해 기존 응집침전시스템에 비해 장치 크기도 매우 작은 편으로 시스템 설치를 위해 소요되는 부지면적의 경우 응집침전시스템의 1/7 정도에서 설치가 가능하므로 부지확보 면에서 경제적이라고 판단된다. 또한 고농도 인 및 SS 제거율을 높이기 위해 기존 응집침전시스템 후단에 여과설비 추가를 고려할 수 있다는 점을 감안하면, 본 개발 시스템이 경제적으로 더욱 효과적인 것으로 판단되었다.

3-2-2. 시스템별 약품소요량 비교

본 연구에서 경제성 평가를 위해 적용한 유량 1400 m³/day, T-P 90 mg/L 이하, SS 300 mg/L 이하인 반류수와 같이 고농도의 인을 제거하고자 할 경우 일반적인 하수처리장에서 적용되는 응집제량은 A/P 물 비 5 이상을 기준으로 산정된다. 이에 반해 본 연구에서 개발된 완속교반/침전 여과시스템의 경우 A/P 물 비 3 에서도 90% 이상의 인 제거성능을 나타내었으며, 이에 따라 시스템 적용시 약품비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 9는 유량 1400 m³/day, T-P 90 mg/L 이하, SS 300 mg/L 이하인 반류수 처리 시 일반적으로 적용하고 있는 기존의 응집침전시스템과 본 개발시스템에서의 약품비용을 나타낸 것으로 일반적인 응집침전시스템에 비해 연간 27백만원 정도의 약품비용을 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

3-2-3. 시스템별 전력비 비교

고농도 인 및 SS 제거를 위해 일반적인 응집침전시스템을 적용할 경우 소요되는 전력비는 크게 급속교반 및 완속교반 시 교반기 가동에 의한 것이다. Table 10은 1일 1,400m³의 반류수(탈수여액)를 처리할

경우 각 시스템별 세부장치에서의 전력사용량과 연간 전력비를 나타낸 것으로 기존 응집침전시스템의 세부장치는 완속교반기와 급속교반기를 고려하였으며, 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템의 세부장치는 Backwash Pump, Backwash Blower, 완속교반/침전조용 Blower, Compressor로 설정하였다. 그리고 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템의 경우 각 세부장치의 가동시간은 1일 15.5회인 반류수에 대한 여과/역세 횟수를 적용하였다.

자료에서 보는 바와 같이 응집-침전시스템에 의한 반류수 처리 시 1일 전력사용량은 72 kWh이고, 이를 연간 사용되는 전력비로 계산하면 연간 1,576,800원이다. 이는 완속교반/침전 섬유여과시스템에 비해 1.68배 이상 높은 수치로 약품비의 경우와 마찬가지로 반류수 내 인 및 SS 제거 시 일반적인 응집침전시스템을 적용하는 것보다 본 개발시스템인 완속교반/침전 섬유여과시스템을 적용하는 것이 보다 경제적인 것으로 판단된다.

3-2-4. 시스템별 연간 운전비용 비교

본 연구대상인 G 하수처리장은 반류수 중 SS, T-N, T-P 농도가 매우 높은 탈수여액을 대상으로 1,400 m³/day 규모의 반류수 처리 시설을 운영하고 있다. G 하수처리장에서 발생하는 탈수여액 내 T-P 농도는 평균 90 mg/L 정도로 하수방류수 내 총 인 농도를 0.2 mg/L 수준으로 낮추기 위해 탈수여액 내 인 제거율은 69.2% 이상으로 설정하여야 한다. 본 연구에서는 탈수여액 내 인 제거율을 70% 이상 얻을 수 있는 조업조건을 기준으로 응집-침전시스템 및 완속교반/침전 그물망 압착식 섬유여과시스템에 대해 연간 운전비용을 산정, 비교하였다.

연간 운전비용은 앞 절과 동일한 방식으로 시스템 운전에 필요한 전력비와 응집공정에 소요되는 연간 약품비용을 합하여 산정하였으

Table 10. Estimation of power consumption and electricity cost for reject water treatment by two systems

Item	General coagulation and sedimentation system	Slow mixing/sedimentation fiber filter system
Reference Power & Usage Time by Device	Rapid stirrer 1.5 kW, 1440 min/day Slow stirrer 1.5 kW, 1440 min/day	Backwash pump 3.7 kW, 77.5 min/day Backwash Blower 17.3 kW, 62 min/day Blower 0.87 kW, 1364 min/day Compressor 1.5 kW, 15.5 min/day
Electricity Consumption by Device	Rapid stirrer 36 kWh/day Slow stirrer 36 kWh/day	Backwash pump 4.8 kWh/day Backwash Blower 17.8 kWh/day Blower 19.8 kWh/day Compressor 0.4 kWh/day
Total Power Consumption per Day	72 kWh/day	42.8 kWh/day
Annual Electricity Costs	1,576,800 won/yr	937,320 won/yr
Annual Electricity Cost Ratio	Cost ratio of general coagulation and sedimentation system to slow mixing/sedimentation fiber filter system= 1.68	

Remarks

1. Reject water flow rate based on 1400 m³/day, T-P 90 mg/L or less, SS 300 mg/L or less
2. Energy charge: Applied for general industrial energy charge (60 won/kWh)
3. Excluding electricity consumption by influent pump (using a gravity fiber filter system)

Table 11. Estimation of annual operating cost for reject water treatment by two systems

Item	General coagulation and sedimentation system	Slow mixing/sedimentation fiber filter system
Daily Coagulant Requirement	766 L/day	460 L/day
Annual Coagulant Costs	67,062,700 won/yr	40,241,250 won/yr
Total Power Consumption per Day	72 kWh/day	42.8 kWh/day
Annual Electricity Costs	1,576,800 won/yr	937,320 won/yr
Annual Operating Costs*	68,639,500 won/yr	41,178,570 won/yr
Annual Operating Costs Ratio	Cost ratio of general coagulation and sedimentation system to slow mixing/sedimentation fiber filter system = 1.67	

*Operating Costs = Coagulant Cost + Electricity Cost

며, 이를 반류수 1 m³ 당 연간 운전경비로 환산하여 Table 11에 나타내었다.

Table 11에서 보는 바와 같이 반류수 처리를 위한 응집-침전시스템의 연간 운전비용은 68,639,500원이었으며, 완속교반/침전 섬유여과시스템의 연간 운전비용은 41,178,570원으로 나타났다. 따라서 연간 운전비용을 감안할 때 반류수 내 고농도 인 및 SS 제어 시 일반적인 응집-침전시스템에 비해 완속교반/침전 섬유여과시스템을 설치하는 것이 보다 경제적인 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 하수처리장에서의 총 인 배출량 저감을 위해 일체형 완속교반침전조와 섬유여과기를 이용한 개발시스템을 적용하였으며, 하수 방류수를 처리하는 방법과 고농도의 인을 함유하고 있는 반류수를 처리하는 방법 중 보다 경제적으로 효과적인 방법을 선정하고자 하였다. 또한 총 인 제어를 위해 개발시스템을 운영하는 경우 일반적인 응집-침전시스템에 비해 경제성을 확보할 수 있는지를 검토하고자 하였다.

이를 위해 대상 하수처리장에서 배출되는 방류수 내 T-P 농도를 0.2 mg/L 수준으로 저감시키기 위해 하수처리공정 후단(A)과 탈수조 후단(B)의 반류수를 제어하는 경우에 대해약품비용과 전력비용을 검토하였으며, T-P의 목표제거량을 92.4 kg/day으로 선정한 경우 하수처리공정 후단에서 처리하는 경우에 비해 탈수조 후단에서 처리하는 경우약품비용은 약 1/2.4, 전력비용은 약 1/120 소요되는 것으로 나타나 반류수를 제어하는 것이 보다 경제적인 것으로 판단되었다.

한편 반류수 처리를 위해 개발시스템인 완속교반/침전 섬유여과시스템과 일반적인 응집침전시스템을 적용하는 경우에 대한 경제성을 검토한 결과, 완속교반/침전 섬유여과시스템이 일반적인 응집침전시스템에 비해 설치면적이 약 1/7로 작게 요구되었으며 약품소요량 및 전력비를 포함한 연간운전비용은 약 1/1.7 소요되어 보다 경제성이 있는 것으로 평가되었다.

따라서 하수처리장에서의 총 인 배출량 저감하여 배출허용기준을 만족하기 위해서는 기존의 방법으로 하수 방류수를 처리하는 것보다 본 연구의 개발시스템인 완속교반/침전 섬유여과시스템을 이용하여 반류수 내 고농도 인 성분을 제어하는 것이 보다 경제적인 것으로 판단되었다.

감 사

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

References

1. Ministry of Environment, Korea, Guidelines for TMDL management (2004).
2. Ministry of Environment, Korea, 『SEWERAGE ACT』 and 『ENFORCEMENT DECREE OF THE WATER QUALITY AND AQUATIC ECOSYSTEM CONSERVATION ACT』 (2010).
3. Han River Water Management Committee, "Feasibility Study on the Application of Physicochemical Process for Phosphorous Removal in Environmental Facilities Located in Upper of the Watershed Lake," National Institute of Environmental Research, Han River Environment Research Center(2008).
4. Ministry of Environment, Korea, "Utilization of Low Concentration Wastewater Treatment System by New Material Separation Membrane and Catalyst Ozone Process," 3-4, 95-101(2005).
5. US. EPA REGION 10, April, Advanced treatment to achieve concentration of phosphorus(2007).
6. Rittmann, B. E and McCarty, P. L., Environmental Biotechnology, McGraw Hill Korea, 579-590(2002).
7. Neethling, J. B., Stensel, H. D., Sandino, J., Tsuchihashi, R., Clark, D. and Pramanik, A., "Achieving Low Effluent Total Phosphorus Concentration," Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2013, 423-438(2013).
8. Jeyanayagam, S., "True Confessions of the Biological Nutrient Removal Process," *Florida Water Resources Journal*: January (2005).
9. John Bratby, "Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment," 2nd. Ed., IWA Publishing, London-Seattle, 119-149(2006).
10. Hwang, E. J. and Cheon, H. C., "High-Rate Phosphorous Removal by PAC(Poly Aluminum Chloride) Coagulation of A₂O Effluent," *Korean Journal of KSEE*, **31**(8), 673-678(2009).
11. 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," *KSWST Journal of Water Treatment*, **22**(2), 89-97(2014).
12. Kim, M. H., Kim, M. R., Cheon, Y. J., Kim, G. H., Kim, J. S. and Jang, J. G., "Development of Treatment System for Sewage and Wastewater with High Concentration of Phosphorus and SS," *Proceedings of the Kor. Environ. Sci. Soc. Conf.*, October, Daegu(2016).
13. Park, K. Y., Lee, K. and Kim, J., "Manufacture of PAC(Polyaluminum Chloride) by Partial Decomposition of Aluminum Chloride Hexahydrate," *J. of the Korean Institute of Chemical Engineers*, **32**(5), 742-746(1994).