

하수처리수 재이용을 위한 막분리 공정시 응집조건에 따른 투과효율 변화에 관한 연구

정진희 · 장성호¹⁾ · 최영익*

동아대학교 환경공학과, ¹⁾부산대학교 지역환경시스템공학전공
(2011년 3월 22일 접수; 2011년 4월 8일 수정; 2011년 4월 23일 채택)

A Study on Flux Efficiency on Membrane for Water Reclamation according to Coagulations

Jung-Jin hee, Sung-Ho Jang¹⁾, Young-Ik Choi*

Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
¹⁾Department of Environment System Engineering, Busan University, Busan 609-735, Korea
(Manuscript received 22 March, 2011; revised 8 April, 2011; accepted 23 April, 2011)

Abstract

The objectives of this research are to investigate the proper coagulation conditions which are a type and doses of coagulants, mixing conditions (velocity gradients and mixing times), pH and so on through Jar-test, to evaluate the flux variations, permeate, backwashing according to characteristics of pretreatment of the wastewater by means of MF membranes for river maintenance water reuse. The effluent water from B-city K-sewage treatment plant are used for this research. Turbidity and suspended solids(SS) are 14.2 NTU and 10.4 mg/L respectively. This condition causes fouling for membrane process. The flux decline could be reduced when coagulation pretreatment was carried out. Optimal coagulations PAC which are commonly used in the sewage treatment plant was observed in this research. The results indicate that an optimal coagulation dose and pH are 80 ppm and pH of 7 respectively, but coagulation efficiency was lower at strong acid or strong base. Results showed that continuous and steady operations in membrane separation process by means of the effective removal of organic matter and turbidity with coagulation pretreatment of sewage secondary effluent were achieved.

Key Words : Sewage treatment, Water reuse, Coagulation-membrane, Coagulant, Micro Filtration(MF)

1. 서론

물은 생명의 근원이자 인간 생활에 가장 필요한 요소 중의 하나인데, 최근 도시화와 산업화에 따른 물 부족으로 인해 앞으로 물 공급에 큰 차질이 있을 것으로

예상된다. 현재 우리나라는 UN의 국제인구행동연구소에서 정한 물부족 국가(Water Stress Country)로 분류되어 있는 만큼 곧 다가올 물부족 상황에 대해 사전 준비와 대책이 시급하다고 할 수 있다(환경부, 2010). 이러한 물부족 상황을 해결하기 위한 방안으로 대체수자원의 개발이나 다목적 댐 건설을 들 수 있으나, 곧 환경파괴의 악순환으로 이어지기 때문에 환경파괴를 최소화하면서 대체수자원을 확보하기 위해서는 강수량이 많을 때 적극적으로 이를 이용하는 방안 및 물을 재이용할 수 있는 기술개발에 대한 국가적인 차원에

*Corresponding author : Young-Ik Choi, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
Phone: +82-51-200-5575
E-mail: youngik@dau.ac.kr

서의 대책이 절실히 요구되고 있는 실정이다(서울시 정개발연구원, 1999). 이러한 관점에서 하수처리장 최종 방류수에 대한 재이용은 세계적인 관심의 사항으로 대두되고 있으며, 많은 나라에서 이에 대한 연구가 수행되거나 수행 중에 있다. 국내의 경우에 있어서도 하수처리수 재이용수에 대한 실용화가 점차적으로 이루어지고 있으며, 여러 형태의 사용 목적에 맞도록 이용되고 있다(Asano, 1988). 그러나, 아직까지 하수처리의 재이용에 대한 법제와 연구는 여러 선진국에 비해 미흡한 실정이다. 대부분 하수처리장에서 발생하는 하수처리수는 그대로 하천이나 바다로 방류되고 있으며, 하수처리수에 대한 재이용은 대부분 하수처리장에서 세척수 및 청소수 등으로만 한정되어 이용되어지고 있고, 그 이용률은 불과 5.4%로서 다각적인 재이용 방안이 시급히 요구되고 있다(환경부, 2004). 따라서, 하수처리수를 해역으로 방류했을 경우에도 연안해역에 미치는 영향에 관한 심도있는 평가도 선행되어야 할 것이다(이, 2007). 하수처리장 방류수를 재이용하기 위해서는 기존 방류수질보다는 한 단계 높은 수준의 처리가 필요하다(한, 2010). 현재 하수처리수 재이용 시스템으로 가장 많이 이용되는 방법으로 응집-침전-사여과-활성탄흡착-소독과 같은 공정이며(Kirkpatrick와 Asano, 1996; Viessman와 Hammer, 1998). 최근에는 막분리에 대한 기술향상과 경제적 비용의 감소로 인해 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Asano, 1998). 따라서, 본 연구에서는 하수처리수 재이용을 위해 응집-막분리 공정을 이용할 때에 응집실험(Jar-test)을 통하여 응집제 주입량, 교반시간, pH 등 최적의 응집조건을 도출하고자 하였으며, 응집 전처리된 처리수를 정밀여과(MF)막을 이용하여 처리함으로써 하천유지용수로의 재이용 가능성을 더욱 높이는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 연구에서는 B시 K하수처리장에서 응집순환변법으로 처리되어 최종 방류되는 하수처리수를 원수로 사용하였다. 최종 방류수의 pH는 평균 7.4(7.2~7.9)를 나타내었다. 최종 방류수의 유기물질에 대한 응집효율을 예상할 수 있는 SUVA(specific UV absorbance) 값은 2.31 L/mg·m를 나타내어, SUVA 값을 기준으로 하여 유기물 성분의 특성을 나타낸 Edzwald(정, 2002)와 Van Benschoten(Tipping와 Ohnstad, 1984)의 분류에 의해 3.0 이하로 친수성 성분이 증가 되는 것으로 나타났다. 탁도 및 SS 농도는 평균 14.2 NTU와 10.4 mg/L로 나타나 장기적이고 연속적인 막분리 공정의 운전시 막오염(fouling)을 유발시킬 수 있기 때문에 막분리 공정 이전에 응집 전처리를 실시하였다. 하수처리장 최종 방류수에 대한 수질분석 결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 방법

2.2.1. 응집실험

하수처리장 최종 방류수에 대한 응집 실험은 자-테스터(Jar-tester, model C-JT C. Co., Korea)를 이용하여 실시하였다. 최적 응집조건을 평가하기 위해 속도 경사(G), 교반시간(T), 응집제 주입량 및 pH 등을 변화시켜 실험을 실시하였다. 1 L 비이커에 원수를 넣고 응집제를 투입한 후 급속교반 및 완속교반을 거친 후 원수 내에서 플록이 형성되게 하여 침전시킨 뒤 상등수를 채수하여 시료를 분석하였다.

응집제로는 최근에 많이 이용 중인 무기 고분자 응집제 PAC(Poly Aluminum Chloride, 17%)를 이용하였다. PAC는 일반적으로 하수처리장에서 많이 사용되고 있는 17% 폴리염화알루미늄(PAC)을 사용하였으며, 염기도(OH/Al)가 45~60%이고 알루미늄 함량

Table 1. Characteristics of final effluent

Parameters	pH	COD _{Mn}	SS	Turbidity	SUVA
Units	-	mg/L	mg/L	NTU	L/mg·m
Range	7.2~7.9	10.4~19.2	4.7~21.7	11.4~17.3	1.31~2.91
(Average)	(7.4)	(14.9)	(10.4)	(14.2)	(2.31)

Table 2. Characteristics of used PAC coagulant

Parameters	Density (20 °C)	Al ₂ O ₃ (%)	Basicity (%)	pH (-)	SO ₄ (%)	NH ₃ -N (%)	Fe (%)
PAC	1.19 <	10.0~11.0	45~60	3.5~5.0	< 3.5	< 0.01	< 0.01

은 Al₂O₃로 환산한 양이 10~11%, 비중이 약 1.19이다. PAC는 반응조의 용량과 응집제 주입량과의 관계를 고려하여 Jar-test 전 0.17%로 묽혀 사용하였다. 응집제 PAC의 특성을 Table 2에 제시하였다.

2.2.2. 막분리 실험

하수처리장 최종 방류수에 대하여 최적 응집조건에서 처리된 처리수를 중공사형 정밀여과(MF, 세공 크기 0.1 μm, 재질 PVDF (polyvinylidene fluoride)막을 이용하여 막분리 실험을 실시하였다. 운전압력이 약 2 kgf/cm² 이상에 도달하였을 때 운전을 정지하였으며, 운전 중 시간변화에 따른 유량, 압력 및 flux를 측정하였다. 여과수의 용량측정은 electronic mass-balance (model Hansung HS2140 electronic mass-balance)를 이용하여 실시간으로 투과유량을 측정하였으며, 플럭스(flux, 투과유속)는 3%의 허용오차 이내에 들어가지 않도록 하였고, 모든 실험은 실온(22±1 °C)에서 수행하였다. 또한 플럭스 회복을 위해 막오염(fouling)이 진행된 분리막 표면을 수세 및 2 ppm의 NaOCl로 약품 세정을 실시하였다. 막분리 장치의 개략도를 Fig. 1에 기본적인 운전조건을 Table 3에 나타내었다.

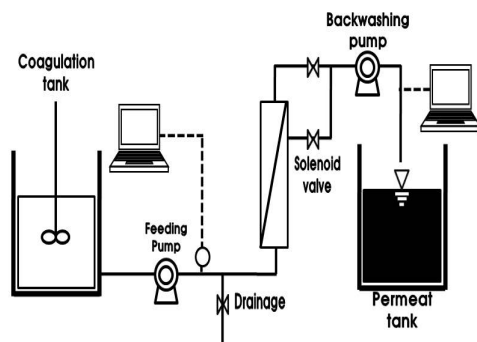


Fig. 1. Schematic of experimental set-up for dead-end micro-filtration.

Table 3. Operating conditions

Items	Units	Conditions	
Flux	LMH	80	
Backwashing flux	LMH	120	
Operating time	Filtration	sec	1,410
	Backwashing	sec	60
	Drain	sec	30
Recovery	%	95~99	
Capacity	mL/hr	800	

3. 결과 및 고찰

3.1. 최적 응집조건 결정

3.1.1. 최적 속도경사(G) 결정

막분리 공정의 전처리로서 응집실험을 통한 최적 운전조건의 도출을 위해 응집제별 최적 속도경사 결정 실험을 수행하였다. 응집제는 PAC를 사용하며, 투여량은 Al₂O₃ 80 mg/L로 환산하여 주입하였다. 급속 교반은 일반적인 운전강도인 200±50 sec⁻¹을 기준으로 하여 100, 150, 200, 250 sec⁻¹로 변화시켰으며, 완속교반은 50 sec⁻¹에서 10 min, 침전은 30 min 이상으로 고정하여 침전시킨 후 상등액을 분취하여 UV₂₅₄, DOC, 탁도 및 SS를 기준으로 최적 속도경사를 평가하였으며 Fig. 2에 나타내었다. UV₂₅₄의 제거효율을 보게 되면 초기 150 sec⁻¹에서부터 제거율이 증가하는 경향을 나타내다가 250 sec⁻¹에서 가장 높은 제거효율인 31.1%와 34.4%를 나타내었으며, 이후 300 sec⁻¹에선 제거효율에서 약간의 감소하는 형태로 나타났다. 탁도의 경우 모든 교반강도에서 60%이상의 제거효율을 나타내었다. SS 제거효율은 UV₂₅₄와 마찬가지로 250 sec⁻¹까지 제거효율이 증가하였지만 300 sec⁻¹에서는 제거효율이 감소하는 것으로 나타났다.

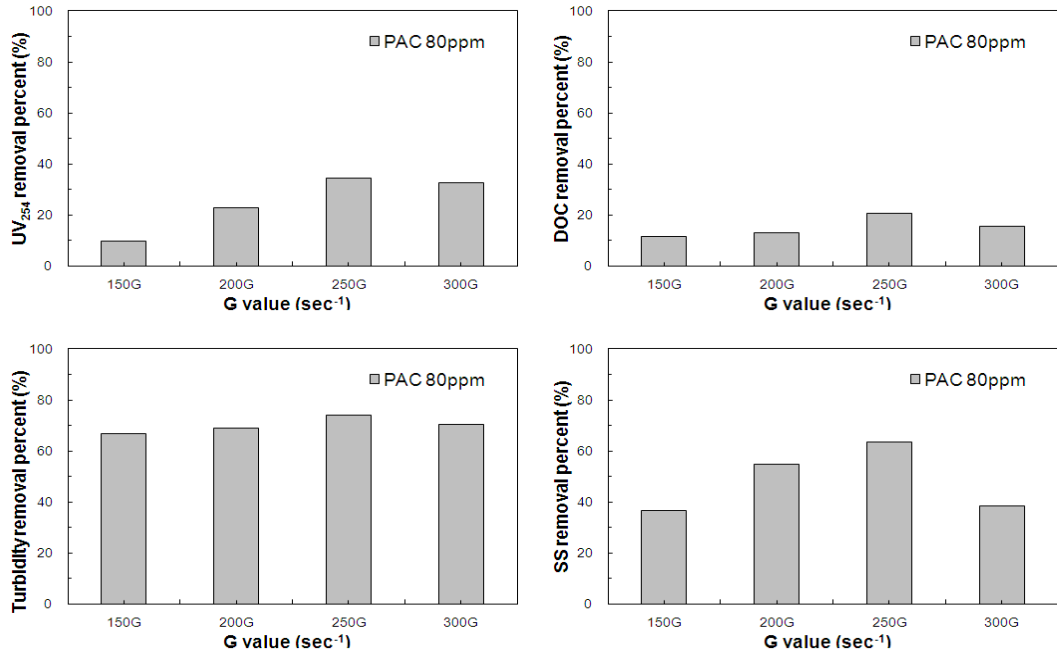


Fig. 2. Variations of UV₂₅₄, DOC, Turbidity and SS removal percent as function of velocity gradients and coagulants in sewage final effluent.

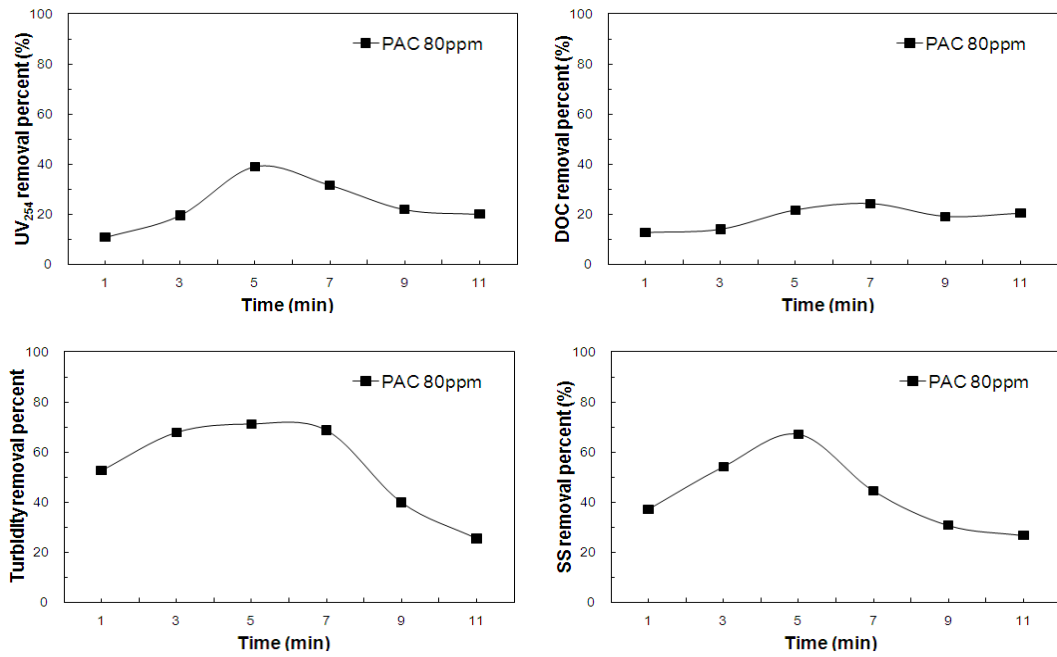


Fig. 3. Variations of UV₂₅₄, DOC, turbidity and SS removal percent as function of mixing times and coagulants in sewage final effluent.

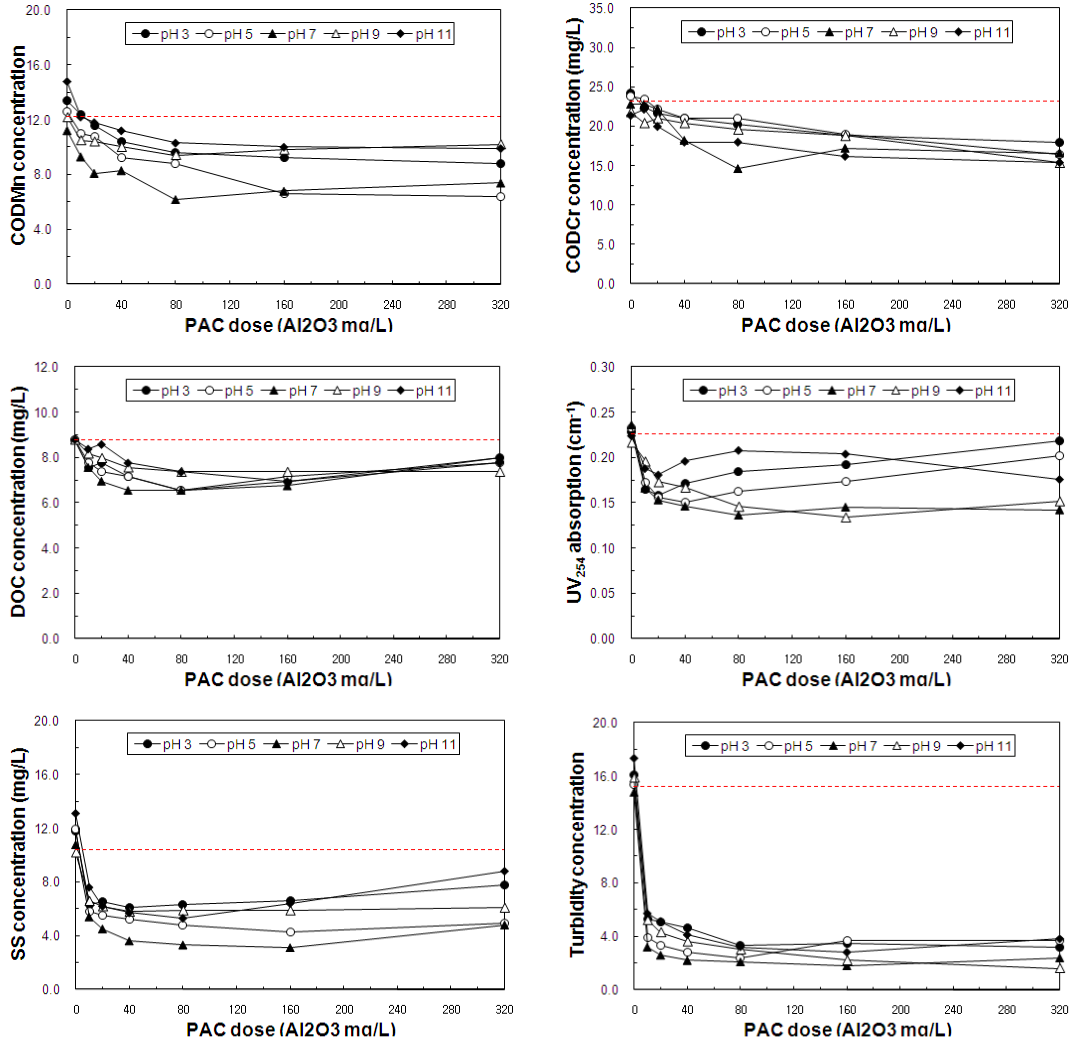


Fig. 4. Variations of COD_{Mn}, COD_{Cr}, DOC, UV₂₅₄ turbidity and SS concentration by jar-test with PAC in sewage final effluent.

3.1.2. 최적 교반시간(T) 결정

앞선 응집제 주입량 및 속도경사 값의 결과를 기준으로 하여 급속교반시간을 1, 3, 5, 7, 9, 11 min으로 변화시켜 Jar-test 실험을 실시하였다. 응집제 주입 농도를 80 mg/L, 급속교반 속도경사를 250 sec⁻¹로 한 후 완속교반 및 침전을 거친 상등수를 분석하였으며 실험결과에 대한 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 실험결과 교반시간 5 min에서 UV₂₅₄ 제거효율이 38.9%로 가장 높게 나타났으며, 교반시간 5 min까지는 증가 추

세를 보이다가 5 min 이후 약간 감소하는 경향을 보였다. DOC의 경우 교반시간 5 min에서 24.1%로 가장 높은 제거효율을 나타내었다. 탁도와 SS의 경우 UV₂₅₄의 결과와 마찬가지로 교반시간 5 min 전후로 하여 제거효율의 증감이 나타났다. 따라서, 상기 결과를 종합해 볼 때 두 가지 응집제 모두 교반시간 5 min에서 가장 제거효율이 높은 최적 응집조건으로 나타났다.

3.1.3. 최적 응집제 주입량 및 pH 결정

최적의 응집 주입량 및 pH를 결정하기 위해서 Jar-test의 운전조건을 급속교반(속도경사(G) 250 sec⁻¹) 5 min, 완속교반(속도경사(G) 50 sec⁻¹) 10 min을 기준으로 pH(3, 5, 7, 9 and 11), 투입량(Alum (Al₂(SO₄)₃·13~14H₂O) 주입농도로 환산하여 10, 20, 40, 80, 160 mg/L) 변화를 주어 실험하였으며, 응집처리된 상등수의 처리특성을 평가하였다. Fig. 4에 Jar-test 실험 후 나온 상등수의 COD_{Mn}, COD_{Cr}, DOC, UV₂₅₄ 분석결과를 나타내었다. pH 3 이하, 또는 11 이상의 강산, 강알칼리성 조건 및 PAC 투입량 40 mg/L 이하일 경우를 제외하고는 전 pH 영역에 걸쳐서 COD_{Mn}와 COD_{Cr}의 제거효율이 약 20% 이상으로 나타났다. DOC의 경우 25.6%를 나타내었으며, PAC 응집제 투여량 80 mg/L 및 pH 7에서 가장 높은 제거효율을 나타내었다. UV₂₅₄의 경우 강산, 강알칼리의 조건이나 20 mg/L 이하의 PAC 투입이 아닌 경우 제거효율이 약 25% 이상을 나타내었으며, PAC 응집제 투여량 80 mg/L 및 pH 7에서 가장 높은 제거효율인 39.8%를 나타내었다.

하수처리장 최종 방류수의 pH가 중성에 가깝다는 점과 무기 고분자 응집제인 PAC를 주입해도 pH가 거의 감소하지 않는다는 점을 고려한다면, PAC는 별도의 pH 조절 없이도 응집-막분리 공정에서 부유물질 및 탁도 뿐 아니라 유기물의 제거에 효율적이라 판단된다.

PAC을 이용한 Jar-test 조건에서 pH 및 응집제 투입량에 큰 변화 없이 60~90%의 탁도 제거효율을 나타내었다. SS의 경우는 응집제 투입량 160 mg/L에서 제거효율이 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 최적주입량 이상의 응집제에 의한 전하역전의 영향으로 부유물질의 효과적인 침전을 방해한 것으로 판단된다. pH별 응집효율을 살펴보면 pH 7에서 탁도 및 SS 제거효율이 각각 84.3%와 60.4%로 나타나 막분리 공정 적용을 위한 응집 전처리시 최적 pH 조건으로 판단된다. Fig. 5에 PAC를 이용한 하수처리장 최종 방류수의 탁도 및 SS 응집결과를 나타내었다.

3.2. 막여과 투과성능 평가

하수처리장 최종방류수인 응집처리 전 원수에 대한 투과성능을 평가하기 위해 막분리 장치를 이용하여 투과성능을 실험하였다. Fig. 5는 응집처리 전 원수

의 정밀여과(MF)시 투과성능(J/J_0 (%)) 결과이다. 초기 flux는 76.8 LMH로 나타났으며, MF막 여과시간 60 min 이후 flux는 48.7 LMH로 투과성능(J/J_0 (%))은 60.9%로 나타나 연속운전시 전처리과정이 필요한 것으로 나타났다.

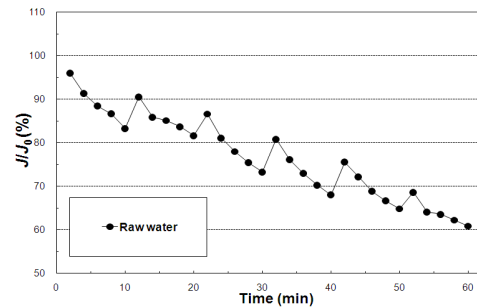


Fig. 5. Time course of membrane permeability of final effluent.

Table 4. Comparison of water quality between raw water and permeate

Parameters (Units)	Raw water	Permeate
pH (-)	7.4	7.1
COD _{Mn} (mg/L)	12.2	8.3
COD _{Cr} (mg/L)	23.2	16.6
SS (mg/L)	10.4	4.2
Turbidity (NTU)	15.2	4.4
Color (PCU)	34	30
DOC (mg/L)	8.8	7.3
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.226	0.181

3.3. 응집제 주입에 따른 여과막 투과성능 평가

PAC 응집전처리된 상등수에 대한 MF 여과수의 수질특성을 Table 5에 나타내었다. 응집실험을 통해 결정된 최적 pH 및 주입량을 기준으로 하수처리장 최종 방류수에 대하여 여과막만을 이용한 처리보다 안정된 투과성능(J/J_0 (%))을 보였으며, 60 min의 연속운전에서도 일정한 투과성능을 보였다.

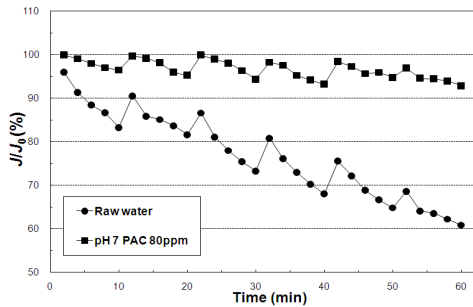


Fig. 6. Time course of membrane permeability as a function of PAC dose in final effluent.

Table 5. Results of water quality in permeate after MF filtration with PAC coagulation in final effluent

Parameters	Units	PAC dose
		(pH 7) 80 mg/L
pH	-	6.8
COD _{Mn}	mg/L	5.2
COD _{Cr}	mg/L	10.6
SS	mg/L	1.3
Turbidity	NTU	1.6
Color	PCU	14
DOC	mg/L	4.5
UV ₂₅₄	cm ⁻¹	0.042

4. 결론

응집-막분리 공정을 이용한 하수처리수의 하천유지용수 재이용 방안으로 응집실험(Jar-test)을 통하여 응집제 종류 및 주입량, 교반조건, pH 등 최적운전 조건의 도출 및 응집 전처리된 처리수를 정밀여과(MF) 막을 이용하여 투과시켜 처리하였다. 처리수의 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 하수처리장 최종 방류수의 응집실험(Jar-test)결과 완속교반 속도경사 50 sec⁻¹에서 10 min, 침전시간 30 min 이상의 조건에서 PCA를 응집제로 사용시 속도경사 250 sec⁻¹에서 5 min이 최적속도경사 및 교반시간으로 나타났다.

2. 하수처리장 최종 방류수의 pH 변화에 따른 응집 실험결과 PAC 최적 응집조건인 응집제 주입농도 80 ppm, pH 7에서 최적 제거효율인 UV₂₅₄ 39.8%, DOC 25.6%, 탁도 86.2%, SS 68.3%를 나타내었다.

3. 하수처리장 2단계 최종 방류수, PAC 80 ppm 및 pH 7로 응집처리된 2단계 최종 방류수에 대하여 정밀여과막(MF)의 투과효율(J/J₀(%))을 평가한 결과 각각 60.9%, 92.9%로 나타나 PAC 80 ppm 및 pH 7로 응집처리된 최종 방류수에서 가장 안정적인 효율을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 동아대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 서울시정개발연구원, 1999, 하수처리수 재이용의 타당성 연구.
- 이대인, 2007, 하수처리수 재이용에 따른 하천과 해역의 환경복원 및 수질관리 모델링, 한국환경과학회지, 16(4), 505-521.
- 정철우, 2002, 정수공정에서 유기물질의 제거를 위한 응집-한외여과(UF)막 공정의 이용, 박사학위논문, 부경대학교.
- 한영립, 2010, 마이크로-나노버블 반응조를 이용한 미생물성장 동력학 계수의 추정에 관한 연구, 한국환경과학회지, 19(5), 647-653.
- 환경부, 2004, 2004년 하수도시설 지도, 점검 결과(상반기).
- 환경부, 2010, 환경백서.
- Asano, T., 1988, Wastewater reclamation and reuse, CRC press, USA: Technomic publishing company.
- Kirkatrick, W. R., Asano, T., 1996, Evaluation of tertiary treatment systems for wastewater reclamation and reuse, Wat. Sci. & Tech, 34(9), 223-229.
- Tipping, E., Ohnstad, M., 1984, Aggregation of aquatic humic substances. Chem. Geol., 44, 349-357.
- Viessman, W., Hammer, M. J., 1998, Water supply and pollution control, sixth ed., Addison Wesley Longman, California, 725-793.