



하수 2차처리 방류수의 총인 고효율 처리를 위한 응집·막분리 혼성처리

Coagulation-membrane separation hybrid treatment of secondary treated effluent for high efficiency phosphorus removal

최욱진^{1,3}·이병하²·박준홍³·차호영⁴·이병찬⁵·송경근^{1*}

Wookjin Choi^{1,3}·Byungha Lee²·Joonhong Park³·Hoyoung Cha⁴·Byungchan Lee⁵·Kyungguen Song^{1*}

¹한국과학기술연구원 물자원순환연구단, ²KG 케미컬(주), ³연세대학교 사회환경시스템공학부, ⁴자인엔텍(주),

⁵순천제일대학교 토목조경과

¹Center for Water Resource Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology, ²KG Chemical Co. Ltd.

³School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, ⁴Zignentech Co. Ltd.

⁵Department of Civil Engineering and Landscape Architecture, Suncheon Jeil College

ABSTRACT

This study investigated phosphorus removal from secondary treated effluent using coagulation-membrane separation hybrid treatment to satisfy strict regulation in wastewater treatment. The membrane separation process was used to remove suspended phosphorus particles after coagulation/settlement. Membrane separation with 0.2 μm pore size of micro filtration membrane could reduce phosphorus concentration to 0.02 mg P/L after coagulation with 1 mg Al/L dose of polyaluminum chloride (PACl). Regardless of coagulant, the residual concentration of phosphorus decreased as the dose increased from 1.5 to 3.5 mg Al/L, while the target concentration of 0.05 mg P/L or less was achieved at 2.5 mg Al/L for the aluminum sulfate (Alum) and 3.5 mg Al/L for PACl. Moreover, alum showed better membrane flux as make bigger particles than PACl. Alum showed a 40% of flux decrease at 2.5 mg Al/L dose, while PACl indicated a 50% decrease of membrane flux even with a higher dose of 3.5 mg Al/L. Thus, alum was more effective coagulant than PACl considering phosphorus removal and membrane flux as well as its dose. Consequently, the coagulation-membrane separation hybrid treatment could be mitigate regulation on phosphorus removal as unsettlable phosphorus particles were effectively removed by membrane after coagulation.

Key words: Coagulation, High efficiency removal, Membrane separation, Phosphorus removal, Wastewater treatment

주제어: 응집, 고효율제거, 막분리, 인제거, 하수처리

1. 서 론

녹조발생은 도시하수 및 공장폐수, 축산영농지 등에서 배출되는 질소와 인 등의 영양물질들이 공공수역으로 유입되어 부영양화가 진행된 상태에서 일조량

증가, 수온 상승 및 정체구역 발생 등과 맞물려 녹조류가 대량 발생하는 현상으로 수계내의 유기물함량을 증가시키는 한편, 수중의 산소고갈로 인한 생태계의 파괴, 악취발생 등의 문제를 유발하고 있다. 악화되는 수질관리를 위해서 환경부에서는 2012년부터 공공하수 처리시설의 방류수 수질기준 중 COD(Chemical Oxygen Demand) 및 T-P(Total Phosphorus)의 기준을

Received 1 February 2018, revised 12 February 2018, accepted 13 February 2018

*Corresponding author: Kyungguen Song (E-mail: kgsong@kist.re.kr)

강화시키기로 하였고, 이는 다변화 되는 오염원에 따른 수질오염 관리지표의 변화요구를 반영한 것이며 (Han and Kang, 2010), 수계의 부영양화를 억제시키고자 하는 노력들이 이루어지고 있는 실정이다.

녹조발생의 원인은 매우 다양하나, 인위적으로 제어하기 쉬운 인자는 인으로 알려져 있다. 인은 자연계에서는 기체상태로 전환이 어렵고, 용해도가 낮아 침전물의 생성이 쉬워 응집제를 이용하여 물리화학적 처리방법을 통하여 제거된다 (Rittmann and McCarty, 2002; Bratby, 2006). 사용되는 응집제는 철염계(Ferric chloride 등), 알루미늄계(Alum (Aluminum sulfate), PACl (Polyaluminum chloride) 등), lime과 같은 칼슘계의 무기 응집제들이 사용되고 있다 (Yeoman et al., 1988).

현재 대부분의 하수처리장에서의 인의 제거는 생물학적 처리를 이용하고 있으나 탄소원의 부족 및 운전 관리 상의 문제로 강화된 규제기준치를 만족하기는 어려운 상황이다. 일반적으로 생물학적처리의 인 제거량은 한계가 있으므로 (Nam, 2012) 생물학적 처리와 더불어 약품투입 설비의 보강 등, 인의 화학적 처리를 위한 다양한 검토가 필요하다. 현재의 강화된 하수처리장 방류수질 기준 달성을 기반으로 조류의 성장이 제한되는 매우 낮은 인 농도 ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 농도 : 0.05 ppm 이하) 수준을 수계에서 유지해야 하는 필요성이 제기되고 있다 (Banu et al., 2008). 일반적으로 하수처리수를 대상으로 화학적 응집에 의해 달성할 수 있는 인의 처리 농도는 응집조건, 원수의 인 농도 등 다양한 조건에 따라 수 mg/L에서부터 0.01 mg/L 이하에 이르기까지 다양한 농도를 얻을 수 있다 (WEF, 1998; EPA, 2007; Takacs et al., 2006). 그러나 최종처리수의 인을 아주 낮은 농도로 안정적으로 유지하기 위해서는 많은 기술적 고려가 필요하다. 수학적 모델을 이용한 화학종과 수산염 및 인제거와 관련된 다른 기작들의 역할을 정하고, 이를 실제 플랜트에서 검증한 시도가 있었다 (Takacs et al., 2006). 또, 최적의 응집제 선정과 관련된 시도로, 염기도가 다른 alum과 PACl의 비교를 통해 단분자성 및 저분자성 Al 종을 주종으로 하는 alum이 인의 제거에 있어 보다 효과적임을 보고하였다 (Han and Kang, 2010).

하지만 응집을 통하여 생성되는 floc의 크기는 매우 다양하여 침전을 통하여 제거될 수 있는 크기부터 침강성을 저해하는 미세입자까지 포함하고 있다. Floc의

생성 양상은 급속교반 및 완속교반의 교반강도 및 Al/P 비에 의하여 변한다고 보고되어 있다 (Han and Moon, 2012). 침전시간을 길게 가져가면 그만큼 소요 부지면적을 증대시키는 결과로 이어지므로 응집으로 발생한 floc을 분리막을 이용하여 제거하고자 하는 연구가 시도되고 있다 (Nam, 2012; Jung and Son, 2008; Song et al., 2008). 응집제의 주입으로 인해 생성된 floc의 크기에 따라 분리막의 flux에 주는 영향이 달라질 것이고, 이는 분리막의 운전에 있어서 필요한 요구막 면적 등 운전인자들에 영향을 주기 때문에 응집 조건에 따른 floc의 형성에 대한 연구는 중요할 것이라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 응집제를 이용한 하수 2차처리수의 응집에 있어서 생성되는 입자의 크기에 따른 인의 분포를 확인하여 적절한 공경의 분리막을 선정하고, 응집제 종류 및 주입량에 따른 응집·분리막 혼성처리에 있어서 인 및 기타 오염물질에 대한 제거 효율을 평가하는 한편, 분리막의 flux에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 진행하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

실험에 사용된 응집제는 alum($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, 7% as Al_2O_3 , 영진환경, 한국), PACl($[\text{Al}_2(\text{OH})_n\text{Cl}_{6-n}]_m$, 17% as Al_2O_3 , 영진환경, 한국)을 사용하였다. 또한 실험에 사용된 원수는 Y하수처리장의 MLE(Modified Ludzack Ettinger)공정에서 나오는 처리수를 사용하였으며, 사용한 원수의 수질은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of treated wastewater at Y wastewater treatment plant.

T-P (mg/L)	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (mg/L)	SS (mg/L)	Turbidity (NTU)	pH
1.2~4.0	0.8~3.8	13.5~17.9	0.8~0.9	6.7~7.3

2.2 응집 실험

하수처리수 중의 인의 제거를 위한 응집에 있어서 alum과 PACl의 인제거 효율을 알아보기 위하여 jar test를 수행하였다. Jar test는 28~300 rpm으로 교반속도 조절이 가능한 JISICO사의 J-JT6S 기기를 사용하



였고, 2 L용량 아크릴 재질 사각기둥 모양 jar를 사용하였다. Alum과 PACl의 주입량은 1.5, 2.5, 3.5 mg as Al^{3+} /L로 하였으며, jar test 실험 조건은 급속교반속도 250 rpm으로 1분 교반 후, 완속 교반속도 60 rpm으로 15분 교반을 수행한 후 30분간 정치하여 침전시킨 후 수면에서부터 5 cm 아래지점에서 주사기를 이용하여 시료를 채수하여 T-P와 PO_4^{3-} -P, turbidity 등을 분석하였다. Jar test는 각 조건별로 2회 수행되었다.

2.3 막여과 실험

분리막의 공경크기에 따른 입자성 인의 제거율을 알아보기 위하여, PACl 1 mg Al/L 응집 완료 후 상등수를 채수하여 Whatman사의 PVDF재질의 membrane filter에 여과시켰으며, 공극 크기는 1.2, 0.45, 0.2 μ m와 30 kD를 사용하였다.

정밀여과 시스템은 막에 가해지는 압력을 일정하게 하여 플럭스의 저감도를 관찰하는 정압식으로 수행하였다. 또한 2 L의 시료를 전량 여과 하도록 구축하였고 추진제로 질소가스를 이용하였다. 정밀 여과에 사용된 막은 0.2 μ m 공극을 갖는 Whatman사의 PVDF재질을 사용하였으며, 1 psig 압력하에서 전량 여과방식으로 수행되었다. 또한 시료 내 침전물이 쌓이는 것을 방지하기 위해 마그네틱 교반기를 이용하여 시료를 혼화하도록 하였다. 시료를 막여과 하기 전 증류수로 약 1시간 동안 여과를 먼저 시켜 막플럭스의 안정화를 수행하였다. 여과 실험은 2회 수행되었다.

2.4 분석방법

각 실험에서 2회 수행된 시료로 각 측정항목을 3회 분석 하였다. T-P와 PO_4^{3-} -P의 분석방법으로는 standard methods (APHA-AWWA-WEF, 2005)에 근거하여 아스코르빅산 흡광광도법을 적용하였으며, 전처리에는 과황산칼륨 분해법을 적용하여 UV/Vis spectrophotometer (DU730, Beckman Coulter, USA)로 측정하였다. 특히 0.05 mg/L 이하의 농도도 측정이 가능하여야 하기 때문에, 측정의 정밀도를 높이기 위하여 일반적으로 사용하는 10 mm 셀 대신에 50 mm 석영 셀을 이용하여 흡광도를 측정하였다.

Turbidity는 HACH사의 2100P Turbidimeter기를 이용하여 측정하였으며, pH는 Orion사의 pH 측정기를 이용하였다. 또한 SS는 standard methods (APHA-AWWA-

WEF, 2005)에 근거하여 분석하였다. 용존성 유기탄소(dissolved organic carbon, DOC)는 수중에 포함된 유기물의 양을 정량하기 위하여 TOC-V CPN (Shimadzu, Japan)을 이용하여 측정하였다. 또한 응집제종류와 주입량에 따른 floc의 성장 변화를 알아보기 위해 응집 실험 후 시료 500 mL을 분취하여 비커에 담은 후 입도분석을 실시하였다. 분석 기기는 0.3 μ m~1000 μ m 까지 분석 가능한 MALVERN사의 Mastersizer Micro system을 사용하여 측정 하였다.

유기물의 성분분석을 위하여 fluorescent excitation emission matrix 기법을 이용하였다. 450W 제논램프가 장착된 Perkin-Elmer사의 LS-50B luminescence spectrometer를 이용하여 여기 강도를 측정하였으며, excitation 파장 200~400 nm, emission 파장 200~600 nm 조건에서 수행되었다. Protein-like 물질은 ex/em = 270-280/320-350 nm, humic acid-like 물질은 ex/em = 330-350/420-480 nm, fulvic acid-like 물질은 ex/em = 250-260/380-480 nm 영역에의 방출된 파장의 강도를 비교하였다 (Chen et al., 2003; Leenheer and Croue, 2003; Yamashita and Tanoue, 2003).

3. 결과 및 고찰

3.1 응집·막분리 공정에 있어서 분리막의 공경이 응집 floc 제거에 미치는 영향

응집·막분리법을 이용한 하수 2차 처리수의 인 제거를 위하여 다양한 공경을 가지는 분리막을 이용하여 1 mg Al/L의 PACl로 응집처리된 하수 2차 처리수 상등액을 여과하였다. Fig. 1과 같이 하수 2차처리수의 T-P는 3.43 mg P/L고, PO_4^{3-} -P의 농도는 1.83 mg P/L이었다. 응집/침전 후 처리수의 총인이 0.17 mg P/L로 나타났으며, 공극 크기가 1.2 μ m 분리막으로 여과 후 0.10 mg P/L가 존재하였다. 0.45 μ m 분리막 여과 후에는 0.6 mg P/L의 잔류 총인 농도를 나타내었고, 0.2 μ m 분리막 여과 후 0.02 mg P/L가 검출되어 목표수질인 0.05 mg P/L를 만족하는 결과를 나타내었다. 하지만 30 kD으로 여과하였을 때 0.2 μ m 분리막 여과의 결과와 같이 총인 농도 0.02 mg P/L가 그대로 검출되었다. 이를 비율로 환산하여 살펴보면, 응집에 의하여 고형물로 전환된 총인은 99.4%이며, 이 중 침전으로 제거될 수 있는 비율은 95%였다. 이후 1.2 μ m

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

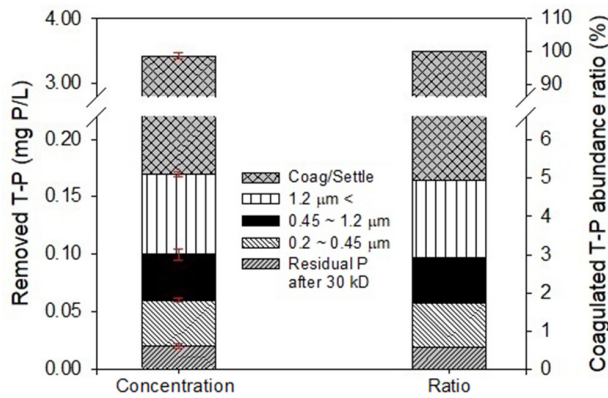


Fig. 1. Removed and residual T-P concentration and abundance ratio with different pore size of membrane filter after 1 mg Al/L PACl coagulation and settlement.

이상이 되는 입자성 인의 비율은 약 2.0%이었으며, 0.45와 1.2 μm 사이는 1.2%, 0.2와 0.45 μm 사이는 1.2%이었으며, 30 kD와 0.2 μm 사이는 0.6%의 존재 비율을 나타내었다. 용존성 인이 존재하는 경우에는 정밀여과나 한외여과로는 제거되기 힘든 것으로 보인다. 응집제를 투여함으로써 생물반응조 유출수의 용존성 인을 입자성 인으로 전환시켜 제거한 연구에서도 응집제 투입 유무에 따라 전체 인 제거율이 72%에서 97%로 증대함을 보였으며, 일부 미세한 입자성 인이 침전되지 않고 유출되는 것으로 보인다 (Park et al., 2014), 따라서 하수 2차처리수의 방류수질 강화를 위해 응집 공정 후 분리막 이용이 필요하다고 판단되며, 분리막의 공정은 입자성 인을 처리하기 위해서 0.2 μm 가 적절할 것이다. 또한 용존성 인의 제거를 위해서는 응집제의 선정 및 응집제의 주입 농도를 최적화 하여 용존성 인의 입자성 인으로의 전환이 중요할 것으로 판단된다.

3.2 응집막분리 공정의 응집제 종류, 주입 농도에 따른 처리수질 비교

분리막의 공정을 정한 후, 응집제의 종류와 주입 농도에 따른 인의 제거 효율을 알아보기 위하여 alum과 PACl을 이용한 응집/침전과 0.2 μm 막분리 실험을 수행하였다. Fig. 2에 나타낸바와 같이 응집제의 주입비율이 증가할수록 여과 이후 인 농도가 감소하였다. 응집제의 주입량을 1.5, 2.5, 및 3.5 mg Al/L로 증가시켰을 때, alum은 0.11, 0.03, 및 0.02 mg P/L의 잔류농도를 나타내었으며, PACl의 경우에는 0.22, 0.09, 및 0.03 mg P/L의

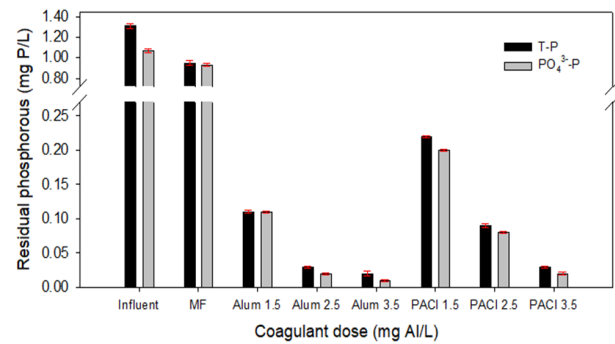


Fig. 2. T-P concentration compare after coagulation/0.2 μm filtration with different kind of coagulants and their dose.

잔류농도를 나타내어 alum이 PACl에 비하여 상대적으로 우수한 응집효율을 나타내는 것으로 판단된다. 0.05 mg P/L의 기준을 만족할 수 있는 응집제의 주입량은 alum은 2.5 mg Al/L이고, PACl은 3.5 mg Al/L의 결과를 얻었는데, 이는 단분자성의 Al종으로 이루어져 있는 alum은 고분자성 Al에 비하여 침전물 형성에 유리하고, Al/P mol비가 증가하여 침전물인 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 형성 및 용존성 인의 흡착반응이 증가되어 인의 제거효율이 높은 것으로 보고되어 있다 (Han and Kang, 2010). 그러므로, 인의 제거에 있어서는 alum의 사용량이 적어 더욱 경제적인 것으로 판단된다.

응집제 종류 및 주입농도별로 수질특성도 비교하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 원수의 탁도는 0.91 NTU를 나타내었으며, 응집과정 없이 분리막으로 여과하였을 때에는 0.35 NTU를 나타내었다. 응집·분리막 과정을 거친 이후에는 3.5 mg Al/L PACl 은 0.19 NTU, 2.5 mg Al/L alum은 0.23 NTU의 가장 낮은 결과 값을 얻을 수 있었으며,

Table 2. EEM intensities decline of influent, MF filtered only and MF filtered after coagulation with alum or PACl.

Coagulants (mg Al/L)	Protein-like	Humic acid-like	Fulvic acid-like
Influent	298	268	480
MF only	207	249	436
Alum	1.5	130	233
	2.5	103	212
	3.5	98	207
PACl	1.5	147	236
	2.5	111	227
	3.5	104	141



pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

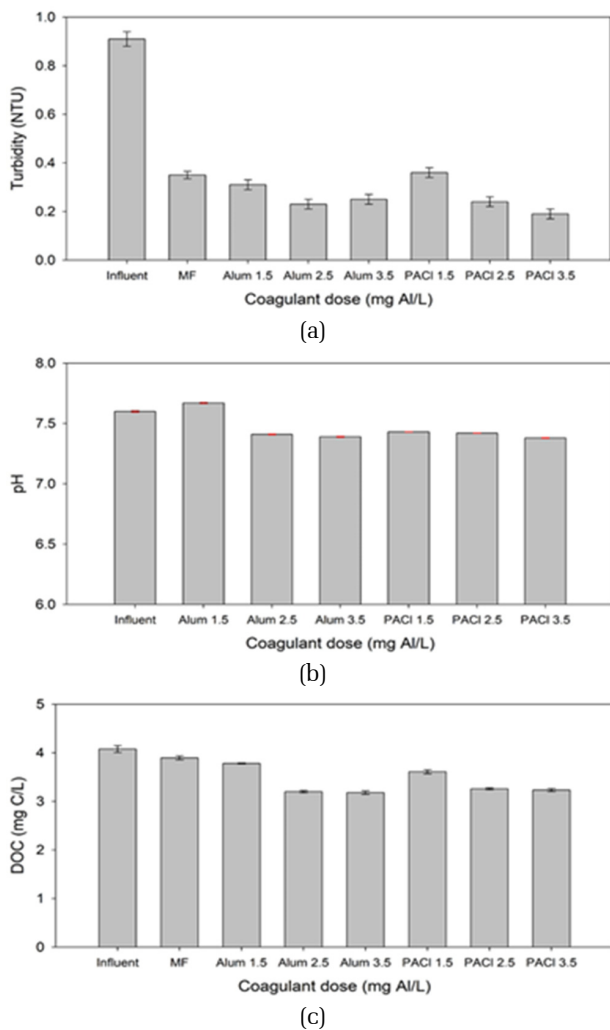


Fig. 3. Residual concentration after of turbidity (a), pH (b), and DOC (c) after coagulation/filtration with different coagulants and dose.

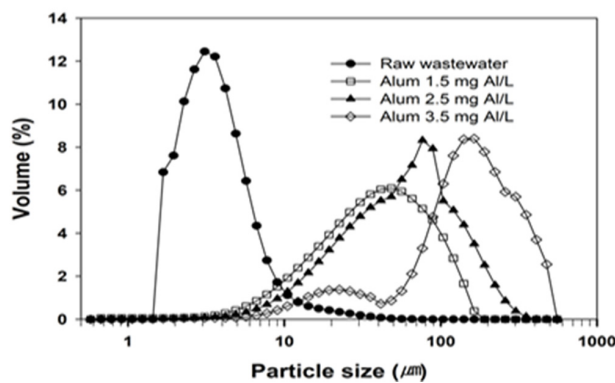
분리막 단독여과에 비하여 우수한 탁도 제거효과를 얻을 수 있었다 (Fig. 3(a)). pH는 응집 후에 7.4로부터 응집제의 주입농도가 증가할수록 alum은 6.6까지, PACI은 6.7까지 감소하였다 (Fig. 3(b)).

DOC는 원수가 4.08 mg C/L를 나타내었으며, 응집제의 농도별로 alum은 3.79, 3.2, 및 3.18 mg C/L의 결과를, PACI은 3.62, 3.26, 및 3.23 mg C/L의 결과를 얻었다. Alum과 PACI 모두 1.5 mg Al/L 이상으로 주입되었을 때, 제거할 수 있는 대부분의 DOC를 제거하는 것으로 보인다 (Fig. 3(c)). 유기물의 특성에 따라 응집-막분리 혼성처리에 있어서 제거 효율이 달라지는데, 크게 protein-like, humic acid-like, 및 fulvic acid-like로 나누어 살펴본 결과 정밀여과 단독으로는 용존성 유

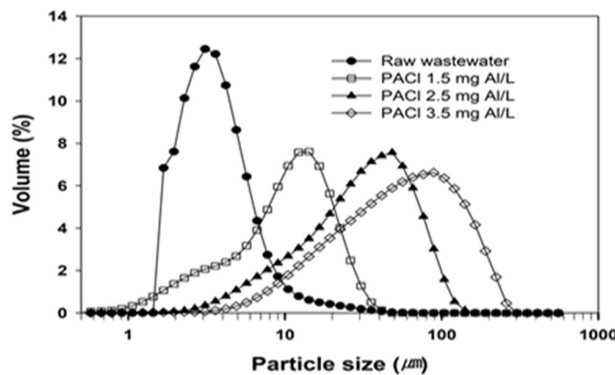
기물의 제거가 원활히 이루어지지 못했다. 하지만 응집-분리막 혼성처리에 의하여 alum과 PACI 주입되면서 protein-like는 최소 50%, 최대 67%정도 제거됨을 확인할 수 있었다. 대표적으로 난분해성 물질로 알려져 있는 natural organic matter (NOM)인 humic acid-like와 fulvic acid-like는 막여과 단독보다 응집-막분리 혼성처리에 의하여 제거율이 조금 상승하지만, 그 제거율이 30%정도에도 미치지 못했다. 다만 PACI 3.5 mg Al/L로 주입된 경우에는 humic acid-like의 제거율은 47%, fulvic acid-like의 제거율은 34%로 증대되었다. 이는 PACI의 주입량이 제거되어야할 인의 양보다 많은 경우 먼저 인과 선택적으로 결합한 후 남은 Al이 유기물질과 결합하여 제거되는 것으로 보인다. Humic substances의 제거기작은 음전하를 띄는 NOM의 제타전위 중화, 응집핵으로 사용하는 포획응집, 혹은 흡착으로 알려져 있으며, 이러한 NOM의 최종적인 침전에는 과량의 Al이 관여하고 있다고 보고되어 있다 (Gregor et al., 1997). 인제거와 NOM 제거를 동시에 고려한 경우에는 PACI이 alum보다 유리한 것으로 보인다.

3.3 분리막의 flux에 영향을 미치는 인자에 대한 조사

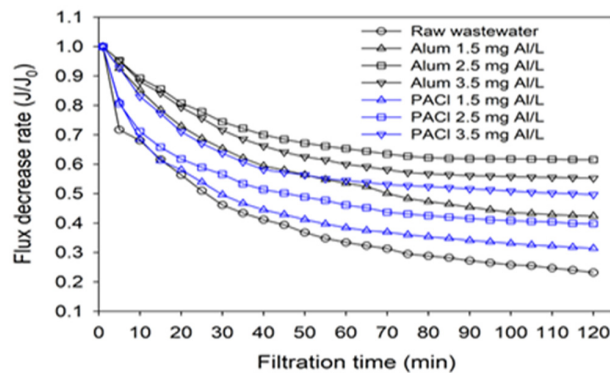
각 응집제 주입농도별로 응집을 실시한 후 침강 전 샘플을 취하여 floc의 크기를 분석하였다. Alum과 PACI 모두 주입농도가 증가할수록 플록의 입자 크기가 증가하였는데, 대체적으로 alum의 입자크기가 PACI에 비하여 큰 영역에 분포하고 있음을 알 수 있다 (Fig. 4). 특히 Fig. 4 (a)의 alum 주입농도에 따라 변화한 최소 입자의 크기가 거의 비슷한 4 μm 영역에서 검출되기 시작한 반면, PACI의 경우에는 주입농도별로 각각 약 1, 2, 4 μm 의 최소 입자크기를 보인다. 이는 분리막의 flux 감소율과 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다. PACI을 1.5와 2.5 mg Al/L로 주입하였을 때에는 여과 20여분 만에 flux가 40%정도 하락하였고, floc의 입도 분포에 따른 플럭스 감소율의 분포경향을 보인다. 응집 전처리에 있어서 UF 분리막의 오염정도를 평가한 연구와 (Jung and Son, 2008) 막결합형 생물반응조 (MBR)에 응집제를 주입한 연구 (Song et al., 2008)에서도 응집제의 주입량이 늘어남에 따라 flux의 유지에 더욱 유리하다고 보고된 바 있다. Alum의 경우에도 1.5와 2.5 mg Al/L로 주입하였을 때에는 생성된 floc의 크기가 클수록 flux의 감소율이 작아지는 경향을 보이는데,



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Size of coagulated flocs with alum (a) or PACI (b) and flux decrease (c) on 0.2 μm membrane filtration after settlement.

3.5 mg Al/L 이상으로 주입되는 경우에는 오히려 flux의 감소율이 증가하는 경향을 보였다. 이는 floc의 입도 분포가 다른 조건들에서는 작은 영역에서 큰 영역으로 이동하는 양상을 보이는데 반하여, alum 3.5 mg Al/L에서는 40 μm 이하 영역에서 peak를 형성함을 관찰할 수 있었다. 이 영역에서의 입자의 영향으로 flux의 감소에 영향을 준 것으로 판단되며, 이는 탁도의

제거양상과도 비슷한 결과를 보인다 (Fig. 3(a)). 막 여과 이후의 탁도가 alum 3.5mg Al/L 주입이 alum 2.5 mg Al/L주입보다 높은 것으로 보아 alum의 과다 주입은 미세입자의 추가적인 생성을 야기하는 것으로 판단된다. MBR에 황산알루미늄을 과다 주입한 경우에는 pH의 감소와 탁도가 증대되어 여과저항을 상승시킨다는 결과가 보고되어 있다 (Nam, 2012). 그러므로 응집제의 종류와 주입량에 따라 floc의 생성 조건이 달라 생성되는 floc의 특성이 달라지고, 이에 따라 분리막의 여과 특성에도 영향을 주기 때문에 최적의 응집조건을 정립할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 강화되는 하수처리 방류수의 인에 대한 수질규제 기준을 만족하기 위한 하수 2차 처리수의 응집·분리막 혼성처리의 인 제거 및 분리막 막여과 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 하수 2차 처리수의 응집/침전법 단독으로는 규제 농도인 0.05 mg P/L를 만족할 수 없지만, 0.2 μm 의 분리막 혼성처리로 충분히 규제 농도치를 만족할 수 있었다.

2) 하수 2차 처리수의 인 제거에 있어서 alum이 PACI에 비하여 낮은 주입 농도에서도 인과 탁도의 제거 및 여과투수성 유지력이 우수하여 경제적인 응집제로 판단된다.

3) 본 연구에서는 응집제 주입량이 증가할수록 잔류 인의 농도가 감소하였으나, 인의 방류기준과 막여과 플럭스의 유지 등을 고려할 때 alum 2.5 mg Al/L의 주입량이 최적으로 판단되며, 실제 적용에 있어서 하수 2차처리수의 수질은 공정별, 지역별, 계절별로 상이하므로 조건을 고려한 최적 주입 농도산정이 선행될 필요가 있다.

결론적으로 하수 2차 처리수의 인 고도처리를 위하여 응집·분리막 혼성처리는 강화되는 배출 규제농도를 만족할 수 있음을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업 (17CTAP-C116746-02)과 한국과학기술연구원 미래원



천연구사업(2E28120)의 지원에 의하여 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

References

- APHA-AWWA-WEF (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21st Ed., AHPA Publishing, Washington DC, pp. 4. 106-115.
- Banu, R.J., Do, K.U. and Yeom, I.T. (2008). Phosphorus removal in low alkalinity secondary effluent using alum, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 5(1), 93-98.
- Bratby, J. (2006). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment*, 2nd Ed., IWA Publishing, London, pp. 119-149.
- Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J.A. and Booksh, K. (2003). Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 5701-5710.
- EPA (2007). Advanced wastewater treatment to achieve low concentration of phosphorus, EPA 910-R-07-002.
- Gregor, J.G., Nokes, C.J. and Fenton, E. (1997). Optimising natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation, *Water Res.*, 31, 2949-2958.
- Han, H.J. and Moon, B.H. (2012). Effect of rapid mixing intensity and coagulant dosages on phosphorus removal by coagulation, *Clean Technol.*, 18, 404-409.
- Han, S.W. and Kang, L.S. (2010). Removal mechanism of phosphorus in wastewater effluent using coagulation process, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 32(8), 774~779.
- Jung, C.W. and Son, H.J. (2008). The evaluation of fouling mechanism on cross flow precoagulation-UF process, *Korean Chem. Eng. Res.*, 46, 639-645.
- Leenheer, J.A. and Croue, J.-P. (2003). Peer Reviewed: Characterizing aquatic dissolved organic matter, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 18a-26a.
- Nam, S.J. (2012). Membrane fouling reduction and phosphorus removal by aluminum sulfate addition, Master's Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, pp. 52-53.
- Rittmann, B.E. and McCarty, P.L. (2002). *Environmental Biotechnology*, McGraw-Hill Korea, pp. 579~590.
- Park, W.C., Lee, M.A. and Sung, I.H. (2014). Phosphorus removal from advanced wastewater treatment process using PAC, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36, 96-102.
- Song, K.G., Kim, Y. and Ahn, K.H. (2008). Effect of coagulant addition on membrane fouling and nutrient removal in a submerged membrane bioreactor, *Desalination*, 221, 467-474.
- Takacs, I., Murthy, S., Smith, S. and McGrath, M. (2006). Chemical phosphorus removal to extremely low levels: experience of two plants in the Washington, DC area, *Water Sci. Technol.*, 53(12), 21-28.
- Water Environment Federation. Municipal Subcommittee and Water Environment Federation. Task Force on *Biological and Chemical Systems for Nutrient Removal* (1998). Biological and chemical systems for nutrient removal. Water Environment Federation, Alexandria, Virginia, pp. 23-58.
- Yamashita, Y. and Tanoue, E. (2003). Chemical characterization of protein-like fluorophores in DOM in relation to aromatic amino acids, *Mar. Chem.*, 82, 255-271.
- Yeoman, S., Stephenson, T., Lester, J.N. and Perry, R. (1998). The removal of phosphorus during wastewater treatment: A review, *Environ. Pollut.*, 49(3), 183 - 233.

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065