



국내 비점오염 현황 및 제어방안: 총설

Assessment and its control of non-point source pollution in Korea: Review

강민우·이상수*

Minwoo Kang·Sangsoo Lee*

연세대학교 환경공학과, 강원도 원주시 연세대길, 26493

Department of Environmental Engineering, Yonsei University, 1, Yeonsedae-gil, Heungeop-myeon, Wonju-si, Gangwon-do 26493, Republic of Korea

pp. 413-420
pp. 421-428
pp. 429-436
pp. 437-446
pp. 447-456
pp. 457-467
pp. 469-480
pp. 481-489

ABSTRACT

Because non-point source pollution is very closely related to hydrological characteristics, its importance is highly emphasized nowadays along with accelerating climate change. Especially for Korea, the non-point source pollution and its control are entirely depending on runoff, precipitation, drainage, land use or development, based on geographical and topographical reasons of Korea. Many studies reported the physical (*e.g.*, apparatus- and natural-type facilities, etc.) and chemical methods (*e.g.*, organic and inorganic coagulants, etc.) of controlling non-point pollutant source pollution, however, those are needed to be reconsidered along with climate change causing the unexpected patterns and amounts of precipitation and strengthen complexity of social community. The objectives of this study are to assess recent situations of non-point source pollution in Korea and its control means and to introduce possible effective ways of non-point source pollution against climate change in near future.

Key words: Chemical controls, Climate change, Non-point source pollution, Physical controls, Precipitation variation, Water pollution

주제어: 화학적 제어, 기후변화, 비점오염, 물리적 제어, 강우변동, 수질오염

1. 서론

우리나라는 몬순기후로 인한 여름철 집중강우와 국토의 68%가 산악지형으로 구성되어 있어 비점오염원에 수질오염이 빈번히 발생한다 (Jeon, 2010). 최근 지구온난화로 인한 강수량의 증가와 강우패턴의 급격한 변화는 홍수와 가뭄, 산사태 등 자연재해의 발생빈도를 증가시키고 있다. 국내 농경지는 비료, 농약, 퇴비 등의 사용

으로 인, 질소 등의 비점오염원이 토양에 다량 존재하고 있다. 특히 여름철 병충해가 많은 시기에 다량 및 고농도 농약을 사용하게 되고, 이는 여름철 집중강우 시 토양유실 및 유거수가 발생하여 하천의 심각한 부영양화를 초래할 수 있다. 이는 기후변화에 의한 강우 변동성으로 비점오염문제에 직접적인 영향을 미친다. 더욱이 우리나라 상수원의 대부분은 경사진 산림지역이나 농경지 주변에 위치하고 있어, 비점오염으로 인한 수질악

Received 1 October revised 26 November 2019, accepted 3 December 2019.

*Corresponding author: Sangsoo Lee (E-mail: cons@yonsei.ac.kr)

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.

화는 물론 주변 생태계에도 부정적인 영향을 끼치고 있다. 비점오염에 의해 주변 수계에 부영양화가 발생하게 되면 막대한 처리 비용과 시간이 소모되며, 원상복구가 매우 어렵다 (Xiang et al., 2017). 따라서 비점오염원의 사전관리 및 유입을 원천적으로 차단하고 오염원별 특성과 발생 원인을 파악하여 대책을 강구하는 것이 필수적이다. 취수원 인근의 경우 해당 유역의 지형적 특성과 토지이용을 면밀히 파악하고, 주변 비점오염원에 의한 부하량을 현장조사함으로써 포괄적인 최적관리기술 및 관련 정책의 수립이 필요하다.

지금까지 다양한 최적관리방안들(BMPs, Best Management Practices)이 제시되어 왔으며, 국내에서는 강우 시 표면 유출량을 저감시키고 이상적인 물 순환을 통한 지하수 충전 및 수질오염을 저감시킬 수 있는 저영향개발(LID, Low Impact Development) 기술이 제시된 바 있다(MOE, 2009). 또한, 유역별 비점오염원의 확산특성을 파악하고 부하량을 예측하기 위한 다양한 경험식과 모델들도 제시되어 왔다 (Kang and Lee, 2016). 본 총설에서는 최근 기후변화로 인한 비점오염 발생요인, 경로 및 대책에 대해 기술하고자 한다.

2. 비점오염과 관리현황

우리나라의 대표적인 다목적 댐(안동댐, 대청댐, 충주댐, 합천댐, 주암댐, 임하댐, 부안댐, 보령댐, 횡성댐, 남강댐, 밀양댐, 용담댐, 장항댐, 군위댐, 소양강댐)의 오염부하량을 조사한 결과 총 오염부하량의 60% 이상이 농촌비점오염원에 기인하는 것으로 조사된 바 있다 (Yi et al., 2015). 경사진 고랭지 밭의 토사 발생과 축산농가의 비가림 시설 미비로 인한 가축분뇨의 수계유입이 주된 비점오염원으로 제시된 바 있다. 소양강댐의 경우 상류지역에 위치한 경사진 고랭지 밭의 토사에 기인한 탁수가 무려 7개월 동안 지속된 바 있고, 주변 축산농가에서 발생한 분뇨가 수계로 유입되어 심각한 부영양화가 발생한 바 있다 (Han et al., 2017).

도시지역의 비점오염원 유입 또한 주변 수계와 환경을 위협하고 있다. 특히 도시지역 혹은 도농복합지역에서 발생하는 생활하수가 대표적인 원인이며, 생활하수에는 음식물 찌꺼기, 계면활성제, 폐식용유 등이 포함한다. 불투수층의 비율이 높은 지역(주로 도심 지역)일수록 초기 강우에 의한 오염물질의 농도가 급속히 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 도시비점 오

염물질의 하천 유입은 하천수 표면의 기름막 형성, 용존산소 저하, 인산염에 의한 부영양화 등 수계 생태계와 보전에 심각한 위협이 되고 있다 (Oh, 2015). 도시 비점을 저감하기 위한 장치형 시설들이 개발되었지만 대부분 하천유역 특성에 맞지 않게 설계되어 있거나 관리 소홀로 인해 그 효율이 매우 떨어지는 것으로 평가되고 있다. 따라서 기후변화에 따른 우리나라 도시하천에 적합한 장치·자연형 시설들에 대한 광범위한 연구가 필요하다 (Chi and Shin, 2016).

급격한 산업화로 인한 인구의 증가, 도시화, 그리고 생활수준(living standard)의 향상은 다양한 신규 비점오염물질들을 발생시키고 있다. 또한, 측정기술의 발전은 또 다른 오염물질에 대한 우려를 낳고 있다. 과거 건축폐기물 및 잔유물, 시멘트 등에 포함된 중금속 등의 유해물질뿐만 아니라 미세플라스틱, 라돈, 우라늄 등이 이에 포함된다 (Choi et al., 2014). 따라서 신규 비점오염물질의 효율적 제어를 위해서는 관련 연구와 제도적 방안이 동시에 수립되어야 한다.

비점오염원으로 인한 수질오염은 2020년에 약 72% 증가할 것으로 예측된 바 있으며, 이러한 수질오염의 경우 지형과 토지이용에 따라서 큰 변동성을 가지기 때문에 경사진 농경지와 산악지형을 중심으로 많은 연구가 진행되고 있다 (Galbraith and Burns, 2007). 국내에서도 지표면의 시공간적 변화를 면밀히 분석하여 저류지의 최적용량을 산정하는 기법을 개발하는 등 기후변화 대응 비점오염의 예측과 제어기술이 많은 관심을 받고 있다 (Choi et al., 2011; Park et al., 2018). 환경부는 “흙탕물 저감사업”의 일환으로 수질관리 교육, 탁수관리 메뉴얼, GIS(Geographic Information System) 및 SDR(Sediment Delivery Ratio)을 이용한 토사발생량과 토사유입량 예측, 모델링을 통한 댐 내 탁수의 유동 파악, 탁수특성에 따른 선택적 방류 등 다방면의 연구가 이루어지고 있다 (Yum et al., 2007).

3. 비점오염 경로

비점오염원의 배출경로의 경우 파악이 쉽지 않기 때문에 비점오염원 제어에 앞서 지역특성에 따른 경로파악이 우선시 되어야 한다. 대표적으로 도시, 산업, 농경지, 산지 등이 있다. 특히 농경지와 산지의 경우 여름철 집중강우에 높은 취약성을 나타내고 있다. 집



중강우 시 하천으로 유입되는 농약 및 비료 등 영양물질로 인한 부영양화 문제가 집중되고 있다. 반면에 도시와 산업지역 비점오염원의 경우는 집중강우 시 오염원 유출이 증가할 수 있지만, 강우가 종료되면 회복이 빠른 특징을 가지고 있다. 체계적인 배출 및 상하수도 시설의 유지보수가 이루어지는 것이 비점오염원 저감과 경로파악에 중요한 요소이다.

4. 비점오염 제어

물리적 수질관리대책으로는 식생대, 등고선 경작, 지표 피복작물, 다년생 작물, 계단식 경작 등이 있다. 하지만 이러한 방법들은 체계적인 관리가 쉽지 않아 오랜 시간 동안 제 기능의 유지하기 어렵다. 최근 들어 중합체를 이용하여 토양침식 및 탁수를 제어하는 연구가 소개된 바 있다. 대표적인 토양개량제로는 음이온성 PAM(polyacrylamide)이 있다. PAM의 경우는 미국을 포함한 많은 국가에서 토양침식과 탁수를 제어하기 위한 비점오염 제어대책으로 제시되고 있다 (Table 1). 이러한 고분자 응집제의 경우 상하수도 정화, 관개농업, 공사현장 등에 적용성이 뛰어나 다방면으로 활용되고 있다 (Park et al., 2017). 또한 제올라이트(zeolite)의 경우 선택적으로 이온교환이 가능하고 흡착 능력을 가지고 있어 탁수와 부영양화에 효과적으로 알려져 있으며, 특히 축산폐수에 기인하는 인, 질소, 중금속 등의 정화와 안정화에 많은 연구가 진행되었다 (Guo et al., 2013).

4.1 물리적 방법

비점오염의 경우 기후변화에 의해 강우의 변동성이 커지고 있어 정확한 강우특성의 파악과 유역특성에 적합한 방법의 도입을 통해 그 부하량이 산정되어야 하며(Yi and Kim, 2014), 처리 용량과 비용을 고려하여 단위면적당 비점오염원의 부하량이 가장 높은 유역부터 저감시설이 우선 설치되어야 한다.

대표적으로 저류지(detention facilities), 인공습지(constructed wetland), 침투시설(infiltration facility), 식생 시설(vegetation facility)과 같은 자연형 시설(natural-type facilities)이 있다. 자연형 시설은 비점오염물질의 저류와 침전을 통해 그 농도와 기여율을 낮추기 때문에 경제적인 이점이 있고, 일반적으로 저류지(detention facilities)와 저류조(storage tank)를 포함하고 있다. 인공

습지의 경우는 하천으로 유입되는 오염원을 인공습지로 유입시켜 처리 후 방류하며, 비점오염뿐만 아니라 홍수의 위험도 낮출 수 있는 장점이 있다.

4.1.1 인공습지

Kim (2017b)은 하천변 또는 홍수터에 설치된 수로형 인공습지(constructed wetland)의 오염물질의 처리 효과 및 경제성을 평가하였다. 3년간(2006~2008년) 모니터링한 결과 TSS(Total Suspended Solids), BOD(Biochemical Oxygen Demand), COD(Chemical Oxygen Demand), TN(Total Nitrogen), TP(Total Phosphorus)가 각각 62.1%, 30.7%, 33.1%, 4.7%, 29.3% 저감되는 것을 보고하였다. 또한, 시간이 경과함에 따라 인공습지가 안정화됨으로써 저감 효과도 증가하는 것으로 판단되었고, 자연형 시설과 비교하여 인공습지가 경제적이라고 평가하였다. Choi et al. (2015)는 바이오갈대(bio-reed)와 세라믹(ceramic)을 이용하여 가축분뇨처리시설 방류수에 포함되어 있는 질소와 인의 저감효율을 평가하였다. 상하류식 인공습지(constructed wetland)의 대조구에는 자갈, 배양토 및 바이오 세라믹(bio-ceramic), 실험구는 바이오갈대와 바이오 세라믹을 혼용한 결과, 바이오 세라믹과 바이오갈대를 혼용한 실험구에서는 가장 높은 질소와 인의 저감효율을 보였다.

물리적, 화학적 및 생물학적 기술 적용을 통한 인공습지시설 확장은 홍수를 경감 시키며, 호수 수질 개선 및 토사 유출을 방지시켜 집중강우 빈도가 높은 지역 특성에 맞게 적절한 인공습지 시설을 추진함으로써 비점오염원저감 및 경제적 측면에 긍정적일 것으로 판단된다.

4.1.2 식생형 시설

식생형 시설(vegetation facility)은 비점오염물질의 제어와 홍수억제의 기능을 가지고 있으며, 식생 수로(grassed swale)와 식생 여과대(vegetative filter strip)로 구분한다. 식생 수로는 금속, 박테리아 등의 오염물질 제거에 효과적이며, 식생 여과대는 유입수가 이동하면서 발생하는 여과 및 흡착을 통해 오염물질이 저감되는 것으로 알려져 있다. Ku (2017)는 5년간 식생을 통한 비점오염물질의 제거효율을 모니터링하였다. TSS, BOD, COD, TN, TP의 EMC(Event Mean Concentrations) 값을 평가한 결과 TSS에서 가장 높은 저감율을 보였으며,

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

Table 1. Physical and chemical treatment for control of non-point pollution sources

Treatments	Target pollutants	Removal results	Reference
1. Physical controls			
1.1 Natural-type facilities			
Constructed wetland	TSS, BOD, COD, TN, TP	Effects of pollution reduction and economic efficiency	Kim et al., 2017
Bio-reed, bio-ceramic	COD _{cr} , TN, TP, SS	High reduction efficiency of nitrogen and phosphorus	Choi et al., 2015
Grassed swale, vegetative filter strip	TSS, BOD, COD, TN, TP	60% to 90% reduction effect	Ku et al., 2017
	TSS, COD _{cr} , TN, TP, Fe, Zn, Pb	High rate of elimination above 90%	Yu et al., 2015
1.2 Apparatus type facilities			
Filtration system, ceramic media	SS	Reduction of contaminated load when ceramic media is applied to upflow stormwater filtration system	Hwang et al., 2017
	TSS, Turbidity, Zn, Pb	Up to 80% removal of heavy metal	Choi et al., 2010
	SS	The thicker the filtration layer, the more effective it was, but with the passage of time, the less effective it was due to the clogging phenomenon	Yun et al., 2017
First flush management system	TSS, TN, TP	Removal efficiency is high even if chemicals are not treated	Kim et al., 2017
Coagulation and sedimentation system, sewage excess sludge	CODMn, SS, TP, TN	If sewage excess sludge is treated together with coagulant, removal rate of SS and TP increases, while removal efficiency of TN is reduced	Yeo et al., 2016
	TCOD _{cr} , BOD, SS, TN, TP	It also obtained relatively stable treatment water despite changes in the inflow quality	Lee and Ha, 2013
2. Chemical controls			
2.1 Inorganic coagulants			
Red mud coagulant	Turbidity, Al, Pb	Al, Pb, and Turbidity all show 85% or more elimination rates	Kim et al., 2000
Alum, PAC	Microalgae	Remove at least 80% of microalgae	Cheong, 2008
Natural coagulants(Soil)	Algae	Inorganic coagulants has a higher removal efficiency than natural coagulants, so it would be better to use natural coagulants as a coagulation aid	Kim et al., 2013
TiCl ₄ , Alum	TP	TiCl ₄ coagulants high phosphorus removal rate, which is believed to be applicable to water treatment as an alternative to Alum coagulants	Shin et al., 2016
Furnace slag, PAC, FeCl ₃	TOC, COD, color, SS	Furnace slag has better removal efficiency than PAC and FeCl ₃	Kim et al., 2003
2.2 Organic coagulants			
Waste activated alumina	TP	By-product utilization provides alternative materials that are 50% cheaper than conventional Alum.	Lee et al., 2014
PAM, gypsum	Soil erosion	More effective in reducing soil loss in mixed PAM and gypsum treatment	Chio et al., 2009
Moringa	E.coli	High adsorption efficiency of E.coli through the cation protein of moringa seed	Xiong et al., 2018
Chestnut Tree, Oak Tea Tree, Pine needles	Chlorophyll-a, BGA	Improve high removal rates and additional suspended solids	Nam et al., 2016



다른 오염물질의 경우 저감효율 분석방법에 있어 다소 결과가 차이가 있는 것으로 나타났다. 식생수로의 경우 COD, TSS 저감효율이 각각 51~86%, 41~56%를 나타냈다. 식생여과대의 경우 강우 50 mm 이하에서 측정 오염물질 모두 80%이상 저감효율을 보였다고 보고하였다. 최종 비점오염 저감 산정 결과 식생수로와 식생여과대 각각 67~86%와 63~91% 저감효율을 보였다. Yu (2015)는 토양층과 여과층으로 구성되어있는 체류지(retention facility)에 식물을 식재하여 비점오염물질의 제거효율을 평가하였다. 국내 지형 및 강우 특성에 적합한 식생 체류지를 설계하였고, 초기침강지(first sedimentation tank), 여재부(filter system), 최종침강지(final sedimentation tank)로 구성하였다. 또한 여재부의 경우 마사토, 모래, 저회(bottom ash), 우드칩(wood chip)으로 충전되었다. TSS, COD_{cr}(Chemical Oxygen Demand cr), TN, TP, 중금속(Fe, Zn, Pb)의 경우 식생 체류지를 통과한 후에 각각 90%, 93%, 93%, 91%, 90% 이상의 높은 저감 효율을 보고하였다.

식생수로는 식생체류지 구조를 통해 강우 시 유속을 느리게 하며 침투 및 정화 특징을 가지고 있다. 이는 도시지역에 위치한 한강 수계에 식생수로 적용이 적절할 것으로 보이며, 토사 배출이 많은 특징을 가지고 있는 지역에서는 효과가 미비할 것으로 판단된다.

4.1.3 장치형 시설

장치형 시설(apparatus type facility)에는 여과형(filtration system), 와류형(vortex system), 스크린형(screen system), 응집·침전(coagulation·sedimentation system), 생물학적 처리형(biological treatment system) 등이 있다. 일반적으로 물리적 혹은 생물학적 기작에 의해 TSS, 박테리아 등 비점오염물질을 제어하는 것으로 알려져 있다. 여과의 경우 강우시 토사와 오염물질을 여과재에 통과시켜 여과한다.

4.1.4 여과형 시설

섬유여재(fiber filter)의 경우 큰 공극이 포함되어 있어 고속 여과에 적합한 것으로 알려져 있고, 면적이 작아 경제성이 높다고 평가된다. 곰팡이 등의 세균 번식, 물리적 변형 등에 강한 내구성이 있지만, 막힘 현상의 빈번히 발생하는 것으로 보고된 바 있다. 섬유여재를 이용하여 황토탁수의 여과능을 평가한 연구에 따르면 1,500 m/day의 여과속도에서 평균 62%의 저감

효율이 있다고 보고된 바 있다 (Park and Kim, 2017).

세라믹 여재(ceramic filter)의 경우 강도가 우수하고 크기가 비교적 균등하기 때문에 비점오염원 저감시설에 폭넓게 활용되고 있다. Hwang (2017)은 비점오염 저감시설에서 세라믹 여재(유효경 2.92 mm, 공극률 60.7%)의 최적 시설운전조건을 결정하였다. 실험 원수는 도로 노면 청소 차량에서 채취한 도로퇴적물과 청수를 혼합하여 사용하였다. 여재층의 깊이가 증가할수록 손실수두(loss of head)가 5 cm 이상 상승하였고, 여과선(filtration linear) 속도에 따른 SS(Suspended Solid) 제거율은 97.7%였으나 유입선속도에 SS의 농도 변화는 없었다. 상하류식 시스템(upstream and downstream system)에 세라믹 여재를 적용할 경우 전체적인 오염 부하를 줄일 수 있으며, 비교적 역세척(back-flushing)이 용이하여 비점오염처리에 있어 적합한 구조라고 판단하였다. Choi et al. (2010)은 초기침강지(first sedimentation tank), 침투지(infiltration system), 여과지(filtration system)로 구분된 장치형 비점오염 저감 모형으로 실험을 진행하였다. 초기침강지는 전처리 시설, 여과지에서는 유지관리와 초기강우 제어가 용이한 수직과 수평여재를 사용하였다. 여재의 흡착능에 따라 최대 80%의 중금속(Zn, Pb)이 저감되었고, 수직여재는 초기강우에 효과가 높았으며 수평여재는 막힘 현상(fouling)이 감소하여 유지관리에 유리하였다. 비슷한 연구로 Yun et al. (2017)은 여재를 이용하여 장치형 비점오염시설의 효율을 평가하였다. 대부분의 여재에서 비점오염물질이 저감되었으나, 여과층이 두꺼울수록 그 효과가 증가하였다. 하지만 시간의 경과에 따라 여재 막힘 현상으로 인한 저감 효율이 현저히 감소하였다.

위와 같이 여과형 시설의 경우 SS 및 중금속 등 비점오염원 제거에 효율적인 것으로 보인다. 여재 사용으로 하천의 부영양화 제어에 높은 영향을 줄 것으로 판단되며, 지속적인 여재 사용 시 막힘 현상 등을 미연에 방지할 수 있는 세척법 등 유지보수의 초점을 두어 연구를 진행하여 농경지 비점오염원 제어에 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것으로 보인다.

4.1.5 초기우수 시설

최근에는 도심지, 도로 및 공원에서 발생하는 오염물질이 강이나 하천으로 유입되는 것을 방지하기 위하여 초기우수 처리시설(first flush management system)이 각광을 받고 있다 (Yin et al., 2015). Kim (2017a)은

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

강우 시 하천으로 유입되는 오염원들을 제어하기 위하여 초기우수 처리시설을 개발하고 그 효율을 평가하였다. 본 연구의 초기우수처리 시설은 전처리, 침전조 및 여과조로 구성되며, 자연 침강을 이용하기 때문에 환경 친화적이고 경제적이다. 연구결과 침강조에서 TSS, TN, TP가 각각 75.0~96.0%, 0.0~85.2%, 29.4~92.5% 저감되었으며, 여과조에서는 TN과 TP 각각 24.2%와 46.8% 제거되었다고 보고하였다. 하천 단지 지하에 설치할 경우 저비용 고효율의 효과가 있을 것으로 주장하였다.

이러한 도심지역에 초기우수처리시설 적용은 기름, 중금속 및 도시폐기물 등 각종 비점오염원 제어에 있어 유지보수가 편리하며, 비점오염원들은 처리시설에 저장하고 우수만 배출하여 친환경 및 유지보수가 효율이 뛰어나 도시지역에 비점오염시설에 적절한 것으로 판단된다. 또한, 집중강우 시 홍수 및 만수로 인한 위험성이 적어 도시지역 적용성이 뛰어날 것으로 보인다.

4.1.6 응집·침전 시설

응집·침전 처리형 시설(coagulation-sedimentation system)은 일반적으로 응집제를 이용하여 비점오염물질을 침전시킨다. 다른 침전법에 비해 빠르게 floc이 형성되어 침전속도를 높일 수 있으며, 타 보조제와 병용할 경우 침전효과가 높아지는 것으로 알려져 있다. Yeo (2016)은 초기 우수와 월류수를 대비하기 위한 일체형 라멜라 침전설비를 고안하고, 응집제와 잉여슬러지의 적정 투입량을 산정하였다. 라멜라 침전설비는 잉여슬러지를 응집제와 함께 유입부에 주입하여 플럭(floc)을 형성시켜 부유물질과 유기물질의 제거효율을 극대화시킬 수 있다고 알려져 있다. 원수는 경기도 파주의 하수처리장에서 채수하였고, 응집제는 PAC(Poly Aluminum Chloride)을 사용하였다. 연구결과 응집제의 투입량을 증가시킬수록 COD_{Mn} (Chemical oxygen Demand Mn), SS, TP, TN의 제거율이 높아지는 경향을 보였다. SS의 경우 85% 이상 제거효율을 보였으며, 잉여슬러지(excess sludge) 20 g/L를 함께 주입하였을 경우 TP와 $PO_4\text{-P}$ 각각 86%, 93%의 제거효율을 보인 반면 TN의 경우 PAC과 잉여슬러지를 통한 제거효율이 떨어졌다. 추후 잉여슬러지 활용 연구를 통해 경제성에 효율이 있을 것으로 보고하였다. Lee (2013)는 응집·침전 처리시스템에서 월류수의 높은 처리효율을

위한 설계 인자를 산정하였다. 응집·침전 처리시스템은 인라인믹서, 응집·반응조, 침전조, 약품 주입처리 구간으로 구성하였고, 유량 100 m³/day에 응집반응조와 침전조에서 각각 5분과 15분 정치시켜 평가를 진행하였다. 응집제는 Alum(aluminum sulfate)을 사용하였고, 응집보조제는 음이온고분자응집제(A-101)를 사용한 결과 탁도, TCODcr(Total Chemical Oxygen Demand cr), BOD, SS, TN, TP가 각각 98.7%, 88.2%, 88.4%, 97.4%, 27.8%, 98.2%로 높은 처리 효율을 보였다.

응집제를 사용하여 침전시키는 구조로 비점오염물질 제어에 있어 높은 처리효율을 보인다. 하지만 비점오염원을 응집하여 침전하는 처리방식을 가지고 있기 때문에 비점오염원에 따른 응집제 종류 및 투입량을 파악하여 처리하는 것이 중요할 것으로 보이며, 슬러지 발생으로 시설 효율이 떨어지지 않도록 신속하게 처리할 수 있는 것이 중요할 것으로 보인다. 또한, 유입구 관리를 통해 최적의 응집 및 침전 효율을 높여 주는 것이 중요할 것으로 판단된다.

4.2 화학적 방법

비점오염물질의 화학적 제어를 위해서 다양한 무기응집제(inorganic coagulants)가 사용되고 있다. 예를 들어 알루미늄(aluminum), 철염(iron salt) 등과 같은 무기성분을 이용하여 무기응집제를 제조하며, 수처리 시 가수분해 되어 다양한 양전하 고분자물질(polymer material)이 된다. 고분자응집제는 전하를 띠는 관능기(functional group)를 통해 다른 전하의 비점오염원과의 가교현상(crosslinking behaviors)으로 응집하는 장점을 가지고 있다. 대표적으로 Alum, $FeCl_3$, PAC 등이 널리 사용되고 있다 (Jung et al., 2017).

4.2.1 고분자응집제

Alum· $FeCl_3$ ·PAC 응집제는 가격이 저렴하고 높은 응집효과를 낼 수 있어 하수처리시설에서 많이 이용되고 있다. Alum의 경우 거의 모든 수질에 사용가능한 반면 사용 pH 범위가 5.5~8.5로 좁은 단점이 있다. $FeCl_3$ 와 PAC은 빠르게 floc 형성하고 침강하는 장점이 있어 빠른 수처리가 가능하지만 부식성이 강하고 처리 후 색도가 남는 등 처리 후 적절한 관리가 필요하다. Kim (2000)은 적니를 이용한 무기 응집제를 개발하여 탁수 및 중금속을 제어하는 연구를 진행하였다.



적니는 수산화알루미늄($\text{Al}(\text{OH})_3$)과 알루미늄(Al_2O_3)의 생산과정에서 발생하는 부산물로 응집제로 이용하기 위해 황산(H_2SO_4)과 염산(HCl)의 수용액을 첨가하였다. 황산을 첨가한 적니 응집제는 알루미늄과 철을 각각 100%와 86% 제거하였고, 염산을 첨가한 적니 응집제의 경우 알루미늄과 철을 각각 75%와 100% 저감하였다고 보고하였다. 탁도 또한 pH 9와 10의 모의 폐수에 염산-황산 적니응집제(red mud coagulant)를 처리한 결과 두 응집제 모두 95% 이상 탁도가 저감되는 것으로 보고되었다.

Cheong (2008)은 공사현장 등에서 널리 사용되는 응집제인 Alum과 PAC를 이용하여 미세조류(microalgae) 제거연구를 진행하였다. 본 실험에 사용된 응집제 원액을 1%로 희석하여 사용하였으며 알칼리도에 따라 제거효율이 달라지기 때문에 적합한 알칼리를 산정하여 처리하였다. 알칼리도 25 mg/L에서 Alum을 처리했을 경우 87.2% 미세조류 제거에 가장 높은 효율의 조건으로 나타났으며, PAC의 경우 알칼리도 30 mg/L에서 90.1%로 가장 높은 제거율을 보였다. Alum, PAC 각각 40 mg/L 및 50 mg/L를 처리했을 경우 88.1% 및 89.0% 제거효율을 보였다. Kim (2013)은 정체수역 및 호소에 적합한 무기 응집제 및 적정 농도 선정 연구를 진행하였다. 연구에서 사용된 무기 응집제를 황토와 토양으로 개량한 천연 무기응집제 artificial clay A, B 및 C를 사용하였다. 천연 무기응집제는 Al_2O_3 , CaO, MgO, K_2O , Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 및 MnO_4 으로 이루어져 있다. 조류밀도 2,950 cells/mL가 들어있는 원수에 황토 50 mg/L를 처리 했을 때 침전 10분과 30분 후 각각 49%와 85% 제거율을 보인 반면 천연 무기응집제를 투입했을 경우 각각 80~90% 및 89~94%의 높은 조류 제거율을 보였다.

Shin (2016)은 알루미늄계열 같은 금속염인 응집제를 사용할 경우 응집된 후 이온들이 잔류하게 되어 체내에 흡수되게 되면 신경계 질환이 발생할 수 있어 대체 응집제로 티타늄(titanium)계열 응집제를 비교 분석하였다. 하수 내에서 알루미늄계열, 티타늄계열 두 응집제의 인 제거특성을 평가하였다. 자테스트(jar-test)를 통해 동일한 농도의 응집제를 투입하여 비교한 결과 티타늄계열 응집제(PTC-HP) OH, /Ti 비가 0.8일 조건에서 90% 높은 인 제거 효율이 가장 높게 분석되었다. 티타늄계열 응집제는 인의 제거 효율이 높아 향후 수처리에 알루미늄계열 응집제를 대체할

수 있을 것으로 판단된다고 보고하였다.

Kim (2003) 제철공정에서 발생하는 부산물인 제강슬래그(furnace slag)를 통해 새로운 응집기술을 개발하고 기존 응집제와 비교 분석 진행하였다. 실험은 염색공단에서 발생하는 폐수에 FeCl_3 , PAC, 제강슬래그 처리하여 교반실험을 통해 응집효과를 비교하였다. 제강슬래그를 처리한 결과 대조구에 비해 TOC와 색도가 각각 79%, 98.7%로 나타났으며, PAC과 FeCl_3 의 경우 59.5%, 89.3%로 나타났다. COD와 SS의 경우 제강슬래그 처리 후 각각 80%, 99.6% 높은 제거율을 보였다. 이는 기존 응집제인 PAC과 FeCl_3 보다 높은 제거율을 보이고 있어 부유물질과 유기물질 제거에 효과적인 방법이라고 판단된다고 보고하였다.

비점오염원제거에 있어 고분자응집제 적용은 높은 효율을 보인다. 소량 처리에도 높은 응집·침강 효율을 보이기 때문에 효율 및 경제적 측면으로 좋은 기술로 판단된다. 하지만 저용량 처리로 고효율을 나타내는 만큼 비점오염원에 적절한 종류 및 용량을 선정하지 않고 이용하면 수질 착색이 발생할 수 있으므로 적절한 적용이 필요할 것으로 보인다.

4.2.2 유기응집제

유기응집제(organic coagulant)는 무기응집제만으로 처리가 힘든 수처리에 이용 가능한 장점이 있다. 무기 응집제의 경우 단독으로 사용할 시 효과적인 응집을 얻을 수 없고, 착색 또는 냄새를 유발할 수 있다. 하지만 유기응집제는 2차오염이 적고 수처리 공정에서 pH 및 온도에 영향을 받지 않고 경제적으로 알려져 있다 (Kim et al., 2016). 특히 음이온 PAM은 농업 및 수처리 등 여러 분야에서 보조응집제로 사용되고 있다. PAM은 토양입단 형성을 안정시키고 액상에서 존재하는 오염물질을 응집·침전시킨다. 또한 미생물에 의한 자연분해 혹은 자연분해가 가능한 무독성 물질로 보고 된 바 있다. Lee (2014)는 중합체 합성에서 발생하는 폐축매 부산물을 활용하여 기존 응집제인 황산알루미늄의 대체재 개발 연구를 수행하였다. 연구결과 기존 황산알루미늄은 인을 94.3% 제거한 반면 개발한 대체제의 경우 96.1%의 제거효율을 보였다. 응집제 제조과정의 간소화와 부산물 활용은 기존 황산알루미늄보다 50% 이상 저렴한 대체재를 제공할 수 있을 것으로 판단하였다.

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

Choi (2009)는 경사진 고랭지 지역 대상으로 국내·외에서 판매되고 있는 7종의 상용 중합체의 효과와 현장 적용성을 평가하였다. 가장 효과가 좋은 상용 중합체의 경우 10 kg/ha 투입하였을 때 경사도 10%와 20%에서 각각 ~40%와 ~21%의 토양유실 저감효과를 나타냈다. 유사 연구로 Kim (2015)은 PAM과 석고를 이용하여 경사도에 따른 토양유실 저감효과를 평가하였다. 경사도 10%, 20%, 30% 조건에서 각각 PAM, 석고(CaSO₄·2H₂O), 혹은 PAM+석고를 처리하였다. 유거수의 경우 대조구에 비해 PAM과 PAM+석고를 처리한 실험구에서 각각 31.8%와 35.6% 감소하였다. 토양유실량의 경우 대조구에 비해 각각 11.4%와 33.4% 저감하였으며, PAM을 단독처리하는 것 보다 석고와 혼용 투입할 시 토양액 내 양이온(Ca²⁺) 증가에 따른 확산이중층 감소 등 토양유실저감에 보다 효과적이라고 보고하였다. 유사한 연구로 비점오염 저감 대책으로 바이오 폴리머와 PAM의 국내 적용성의 평가되었다(Choi et al., 2010). 상용폴리머(Soilfix G1, Ciba Company, China)과 합성된 바이오 폴리머의 토양유실 저감효율은 각각 41%와 23%로 나타났으며, 두 시험구에서 유거수의 차이는 없었다. 지리적 특성을 고려한 토양개량제의 종류, 투입량 및 농도에 대한 추가 연구가 필요하다고 언급하였다.

Xiong (2018)은 탁수의 제어를 위해 모링가(moringa) 씨앗의 양이온단백질을 이용하여 필터를 개발하였다. 양이온 항균 단백질은 탁도 제거를 위한 천연 응고제로 연구되었지만 제거 효율이 낮고 잔류 유기 수준이 높아 적용되기 어려운 측면이 있다. 본 연구에서 모링가 양이온 단백질과 음전하를 띠는 모래 흡착을 통해 필터를 제작하고 효과를 평가하였다. E.coli 흡착실험의 경우 미처리 구에서는 거의 흡착이 없는 반면, 추출한 양이온단백질을 적용하여 개발된 필터의 경우 약 99%의 높은 흡착 효과를 나타냈다. 이는 화학물질을 사용할 수 없는 정수시설에 다양하게 활용될 수 있다고 보고하였다.

Nam (2016)은 식물추출액과 광물추출액으로 혼합하여 천연응집제를 제작하였다. 본 연구에서 개발된 응집제는 응집되어 침전되었다가 부상하는 특징을 가지고 있다. 하천에서 발생하는 녹조 제거 목적으로 응집제 R-119를 개발하였다. R-119의 주성분은 chestnut tree, oak tea tree, ash tree pine needles로 이루어져 있다. Chlorophyll-a시료를 바탕으로 R-119 처리하여 응

집실험을 진행한 결과 저농도 시료에서 chlorophyll-a와 BGA(Blue Green Algae) 각각 98%, 100%의 높은 제거율을 보였으며, 고농도 시료 또한 각각 86%, 76%로 높은 제거율을 나타냈다. 천연응집제의 높은 제거율을 보였고 부가적인 부유성 물질들을 개선할 수 있다고 판단된다고 보고되었다. 비슷한 연구로 Lee (2018)는 천연, 광물, 해수 및 미네랄 성분으로 조류 제거 응집제를 개발하고, 기존 응집제와 성능 및 적용성 평가를 진행하였다. 미네랄계 천연 응집제의 경우 96%의 chlorophyll-a 높은 제거율을 나타냈으며 각각의 응집제의 유기물 제거 효율은 PAC 응집제를 제외하고 나머지 응집제 모두 TOC, DOC 각각 90%, 80% 이상의 제거효율을 보였다.

Lee (2011)는 하천 및 호수 준설 시 발생하는 부유물질의 저감을 위해 키토산응집제를 적용하여 응집과 침전이 가능한 integrated desander and flocculator with inclined settler(IDFIS) 시스템개발 및 평가를 진행하였다. 하천퇴적물질, 황토입자 등 퇴적물의 경우 탁도, SS, COD, TP 각각 98%, 99%, 85%, 95% 감소하는 것으로 나타났다. 키토산 응집제의 경우 기존 Alum과 PAC과는 다르게 pH에 영향을 받지 않고 우수한 응집능을 보였다. 비슷한 연구로 기존의 화학적인 응집제가 아닌 천연응집제로 키토산(chitosan), 양이온 전분, Mg-sericite를 사용하여 미세조류의 응집효과를 판단하여 저비용 고효율의 응집제에 대한 연구가 진행된 바 있다(Choi, 2015). 키토산과 양이온 전분의 경우 미세조류를 각각 35%와 45%로 제거한 반면 Mg-sericite의 경우 56%의 제거효과를 나타내어 가장 높은 응집효과를 나타내었다.

유기응집제의 가장 큰 장점으로 2차 오염이 적고, pH 및 온도에 영향을 받지 않고 높은 제거기술로 사용할 수 있다. 이는 무기응집제의 고용량 투입 시 2차 오염 발생에 위험성이 크기 때문에, 이에 대한 대체 응집제로 사용될 수 있다. 또한, 천연 유기물질을 통한 응집제 개발을 통해 수처리 시 수생동물 섭취 시 문제가 되지 않고 자연적 분해가 될 수 있는 대체 응집제 개발이 이루어져야 한다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 비점오염 현황과 현장에서 활용 가능한 비점오염 저감방안에 대해 고찰하였다. 대



표적인 물리적 방법으로 장치형과 자연형 시설이, 화학적 방법으로는 응집제가 널리 사용되고 있다. 가까운 미래에는 기후변화와 더불어 인구의 증가로 인해 수자원에 대한 수요가 높아질 것으로 예상된다. 따라서 한정된 수자원의 유효도를 높이기 위해서는 종합적인 우수관리체계, 비점오염의 사전제어 및 적정기술의 개발이 절실하다. 또한 획일화된 적용기술과 정책보다는 물관리 일원화와 발맞추어 효과적인 비점오염제어를 위한 정책적 지원과 지역특이성을 고려한 기술의 개발이 필요한 시점이다.

사 사

This work was carried out with the support of 'Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ0125700 42019)' Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Cheong, C.J. (2008). Removal of microalgae using inorganic coagulants in coagulation and sedimentation processes for water treatment, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 30(1), 85-89.
- Chi, H.J. and Shin, G.A. (2016). Selection of best management practices for urban watershed corresponding to the runoff characteristics from non-point pollution sources, *J. Environ. Sci. Int.*, 25(1), 31-40.
- Choi, B.S., Lim, J.E., Choi, Y.B., Lim, K.J., Choi, J.D., Joo, J.H., Yang, J.E., and Ok, Y.S. (2009). Applicability of PAM(Polyacrylamide) in soil erosion prevention: rainfall simulation experiments, *Korean J. Environ. Agric.*, 28(3), 249-257.
- Choi, D., Kim, J.K., Lee, J.K., and Kim, S. (2011). Optimal volume estimation for non-point source control retention considering spatio-temporal variation of land surface, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 27(1), 9-18.
- Choi, H.J. (2015). A comparative study on microalgae recovery rates in response to different low cost bio-flocculant applications, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 31(6), 625-631.
- Choi, H.N., Cho, E.H., Kang, H.G., Park, J.H., and Kang, S.H. (2015). A study on application of eco-friendly follow-up process connected with livestock wastewater treatment plant using the upflow constructed wetland, *J. Korean Soc. Water Wastewater.*, 29(3), 359-370.
- Choi, J.W., Kang, M.J., Ryu, J.C., Kim, D.I., Lim, K.J., and Shin, D.S. (2014). Assessing the action plans in the control area(soyang reservoir) of non-point source pollution, *J. Environ. Sci. Int.*, 23(5), 839-852.
- Choi, J.Y., Chua, M.M., Lee, S.Y., Kang, C.G., Lee, J.Y., Kang, H.M., and Kim, L.H. (2010). Evaluation and design of infiltration and filtration BMP facility, *J. Environ. Impact Assess.*, 19(5), 475-481.
- Choi, Y.B., Choi, B.S., Kim, S.W., Lee, S.S., and Ok, Y.S. (2010). Effects of polyacrylamide and biopolymer on soil erosion and crop productivity in sloping uplands: A field experiment, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 32(11), 1024-1029.
- Galbraith, L.M. and Burns, C.W. (2007). Linking land-use, water body type and water quality in Southern New Zealand, *Landsc. Ecol.*, 22(2), 231-241.
- Guo, J., Yang, C., and Zeng, G. (2013). Treatment of swine wastewater using chemically modified zeolite and bioflocculant from activated sludge, *Bioresour. Technol.*, 15(1), 1-7.
- Han, J.H., Lee, D.J., Kang, B.S., Chung, S.W., Jang, W.S., Lim, K.J., and Kim, J.G. (2017). Potential impacts of future extreme storm events on streamflow and sediment in soyang-dam watershed, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 33(2), 160-169.
- Hwang, Y.H., Seo, Y.G., Kim, H.W., Roh, K.W., Shin, H.S., and Kim, D.G. (2017). Optimization of operation and backwashing condition for an upflow stormwater filtration system utilizing ceramic media, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 39(8), 478-488.
- Jeon, J.H. (2010). Simulation of sediment yield from Imha watershed using HSPF, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 52(6), 39-48.
- Jung, J.H., Park, B.H., Kim, D.Y., Lee, S.C., and Choi, Y.I. (2017). A study on the removal characteristics of organic matter by coagulant (Al and Fe) for the effective coagulation process of sewage treatment plant, *J. Korean Soc. Environ. Technol.*, 18(1), 1-6.
- Kang, T.U. and Lee, S.J. (2016). A simulation method for reduction facilities of natural type for non-point pollution by SWMM, *J. Korean Soc. Hazard. Mitig.*, 16(2), 123-131.
- Kim, D.K., Pak, D.W., and Chang, W.S. (2003). The study of a novel coagulation technology using the atomized molten slag as weighted coagulation additives, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 19(6), 655-661.

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489

- Kim, J.S., Lee, J.R., Han, S.W., Hwang, I.G., and Bae, J.H. (2000). Preparation of inorganic coagulants using red mud, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 22(11), 2085-2095.
- Kim, J.Y., Seo, D.I., and Lee, T.E. (2017a). Effectiveness of settling treatment system to reduce urban nonpoint source pollutant load by first flush, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 39(3), 140-148.
- Kim, M.Y., Choi, Y.H., Lee, S.B., Kim, H.J., Kim, S.H., and Kim, Y.J. (2015). Polyacrylamide, its beneficial application of soil erosion control from sloped agricultural fields, *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, 57(5), 123-128.
- Kim, P.J., Han, E.L., and Kim, Y.C. (2017b). A case study stormwater treatment by channel-type wetland constructed on the flood plane of the stream, *J. Korean Wet. Res.*, 19(1), 80-89.
- Kim, S.B., Kim, Y.S., Kang, S.W., Oh, D.M., and Lee, W.T. (2016). Removal of Cs and Sr in water using chemical and natural coagulants, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(12), 662-666.
- Kim, S.K., Kim, D.K., Kang, S.W., Ahn, J.H., Kim, I.H., Yun, S.L., Lee, S.H., and Lee, W.T. (2013). Removal of algae by natural coagulants of soil origin, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 35(12), 883-888.
- Ku, S.H., Im, J.Y., Oa, S.W., and Gil, K.I. (2017). Analysis of non-point pollution source removal efficiencies according to rainfall characteristics in low impact development facilities with vegetation, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 33(3), 257-255.
- Lee, B.J., Oh, H.C., Ahn, J.H., Kim, Y.M., Kang, H.J., and Kim, S.K. (2018). Algae and nutrient control by using the mineralized coagulant, *J. Korean Soc. Water Sci. Technol.*, 26(2), 45-52.
- Lee, J.H., Yang, S.H., Shin, Y.K., and Bang, K.W. (2011). Treatment of dredging suspended solids using chitosan coagulant, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 33(11), 834-846.
- Lee, S.C. and Ha, S.R. (2013). Evaluation of pilot scale coagulation system design for CSOs treatment, *J. Korean Wet. Res.*, 15(1), 1-8.
- Lee, S.W., Moon, T.S., Kim, H.S., Choi, M.W., Lee, D.S., Park, S.T., and Kim, C.W. (2014). Production of alternative coagulant using waste activated alumina and evaluation of coagulation activity, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36(7), 514-520.
- MOE. (2009). Application of LID technologies to natural nonpoint source control.
- Nam, S.H., Koo, J.W., Kim, E.J., Park, J.R., Jeon, S.L., Park, J.H., Mun, B.C., and Hwang, T.M. (2016). Investigating applicability of natural material based coagulant to control algae bloom, *J. Water Treat.*, 24(6), 103-113.
- Oh, H.E. (2015). A study of people's consciousness for efficient management of nonpoint pollution source, *J. Ecol. Environ.*, 29(5), 803-813.
- Park, K.S. and Kim, Y.C. (2017). An investigation into the performance of a high-speed synthetic fiber filter employing different types of coagulants, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 31(2), 125-139.
- Park, Y.K., Lee, J.K., Kim, J.G., and Kim, S.D. (2018). Multi-objective optimization of BMPs for controlling water quality in upper basin of Namgang Dam, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 34(6), 591-601.
- Park, Y.S., Kum, D.H., Lee, D.J., Choi, J.D., Lim, K.J., and Kim, K.S. (2017). Evaluation of modeling approach for suspended sediment yield reduction by surface cover material using rice straw at upland field, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 32(1), 108-114.
- Shin, S.Y., Kim, J.H., and Ahn, J.H. (2016). Phosphorus removal from municipal wastewater using Ti-based coagulants, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 38(8), 428-434.
- Xiang, C., Wang, Y., and Liu, H. (2017). A scientometrics review on nonpoint source pollution research, *Ecol. Eng.*, 99, 400-408.
- Xiong, B., Piechowicz, B., Wang, Z., Marinaro, R., Clement, E., Carlin, T., Uliana, A., Kumar, M., and Velegol, S.B. (2018). Moringa oleifera f-sand filters for sustainable water purification, *Environ. Sci. Technol. Let.*, 38-42.
- Yeo, I.S., Jo, E.Y., Park, S.M., Kang, G.N., Kim, W.S., Jung, H.H., and Park, C.G. (2016). Study on removal efficiency of suspended solids and organic nutrient in initial rainfall and overflow using sewage excess sludge, *J. Korean Soc. Water Sci. Technol.*, 24(4), 15-20.
- Yi, H.S., Choi, K.S., Chong, S.A., and Lee, S.J. (2015). Assessment of apprehensive area of non-point source pollution using watershed model application in Juam Dam watershed, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37(10), 551-557.
- Yi, S.J. and Kim, Y.I. (2014). Improvement on management of non-point source pollution for reasonable implementation of TMDL - focusing on selection of non-point source pollution management region and management of non-point source pollutant, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36(10), 719-723.
- Yin, Z.H., Koo, Y.M., Lee, E.H., and Seo, D.I. (2015). Development of integrated management system of stormwater retention and treatment in waterside land for urban stream environment, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*,



- 37(2), 126-135.
- Yu, G.G., Choi, J.Y., Hong, J.S., Moon, S.Y., and Kim, L.H. (2015). Development and evaluation of bioretention treating stormwater runoff from a parking lot, *J. Korean Wet. Res.*, 17(2), 221-227.
- Yum, K.T., Park, E.S., Song, S.J., and Lee, G.S. (2007). Consideration on the status and improvement factors of the turbid-water management in multi-purpose dam, *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, 55(12), 123-131.
- Yun, S.I., Lee, Y.J., Ahn, J.H., Choi, W.S., Lee, J.W., Oh, H.C., and Kim, S.K. (2017). Evaluation of filtration and backwash efficiency of non-point source pollution reduction facility, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 39(12), 664-671.

pp. 413-420

pp. 421-428

pp. 429-436

pp. 437-446

pp. 447-456

pp. 457-467

pp. 469-480

pp. 481-489