

생물 저류 방법 적용을 통한 비점오염원 처리시설의 성능평가에 관한 연구

이장수, 박연수, 조옥상*

수원대학교 환경에너지공학과
445-743 경기 화성시 봉담읍 와우안길 17

(2013년 5월 16일 접수; 2013년 7월 17일 수정본 접수; 2013년 7월 18일 채택)

A Study on Performance Evaluation for the Bio-retention Non-point Source Pollution Treatment System

Jang-Soo Lee, Yeon-Soo Park, and Wook-Sang Cho*

Department of Environmental and Energy Engineering, University of Suwon
17 Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-743, Korea

(Received for review May 16, 2013; Revision received July 17, 2013; Accepted July 18, 2013)

요 약

미국 환경 보호청(Environmental Protection Agency, EPA)의 생물저류 설계기준에 근거한 비점오염원 처리시설의 제거효율 및 성능을 분석하고자 기본 모형 실험장치(basic column reactor, BCR)와 파일럿 규모의 식생 실험 장치를 대상으로 각각 수행하였다. BCR을 이용하여 초기강우 유출수의 유입속도(유량), 식재 층의 조성 및 구성 비율, 등 처리시설의 설계에 필요한 적정인자 값을 도출하였으며 이를 식생 실험 장치에 적용하여 비점오염원의 제거 효율을 분석하였다. 비점오염원으로는 합성된 강우(synthetic rainfall)와 실제 현장(도로변과 주차장)에서 채수한 초기강우 유출수(first rainfall runoff)를 각각 사용하였다. 부유물질(Suspended Solid, SS), 생물학적 산소 요구량(Biochemical oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD), 총질소(Total Nitrogen, T-N), 총인(Total Phosphorus, T-P) 분석항목 모두 80% 이상을 상회하는 제거효율을 보이고 있음을 확인하였다.

주제어 : 생물저류, 비점오염원, 초기강우 유출수, 제거효율

Abstract : This study was purposed and performed to evaluate removal efficiency of non-point source pollution in the process and system based on bio-retention design criteria regulated by EPA. Basic Column Reactors (BCR) were prepared for optimal determinations of inflow rate of first rainfall runoff and composition and ratio of soil layers. Removal efficiencies of non-point source pollution from synthetic runoff and real first rainfall runoff, directly sampled from motor way and parking lot, were analyzed, respectively. Removal efficiency of SS, BOD, COD, T-N, and T-P were all shown to be more than 80%.

Keywords : Bio-retention, Non-point source pollution, First rainfall runoff, Removal efficiency

1. 서 론

그동안 우리나라는 수질오염에 영향이 큰 산업폐수, 생활하수 등 점오염원(point source pollution)의 처리를 중점으로 공단 폐수처리장과 하수처리장의 확충을 추진해 왔으나 수질오염에 상당한 비중을 차지하는 비점오염원에 대한 처리 및 관리 없이는 정부가 추진하는 ‘맑은 물’ 수질목표에 도달하기에 한계를 지니고 있다. 비점오염물의 발생이 많은 산업단지 및 택지, 농경지, 산지, 도로 및 교량 등 각종 개발 사업이 비점오염원에 대한 기본적 인식과 고려 없이 추진됨에 따라 비점

오염원의 지속적인 증가를 유발시키고 있다. 더욱이 급격한 도시화로 인한 불투수층 면적의 증가로 인해 고농도의 오염물이 포함된 초기강우 유출수(first rainfall runoff)가 발생되고 이러한 비점오염물은 강우 시에 곧바로 공공수역으로 유입되기 때문에 일별, 계절별 편차가 심하고 수질 및 유량의 예측이 어려우며, 기상조건, 지질 및 지형 등 다양한 수문학적 특성에 따라 영향을 받기 때문에 인위적인 적정관리가 힘든 특성을 가지고 있다. 특히, 도로변 유출수는 주변 하천을 오염시키는 주요 원인으로 파악되고 있으며 교통량이 많은 도시지역 일수록 비점오염원 농도가 높게 나타난다. 도로면에 침적되는 토사 및 각종 자동차 배출오염물, 비산먼지, 침니, 협잡물 등이 초기강우 시 토양 속으로 스며들지 못하고 배수로를 따라 그대로 하천으로 유입되어 하천의 수질에 미치는 영향이 큰

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: wscho@suwon.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2013.19.3.295

것이다. 이와 같이, 비점오염원은 그 발생과 유출경로가 다양하고 성상 또한 일정치 않고 별도의 집수 시스템이 구축되어 있지 않기 때문에 점오염원의 경우처럼 적절한 처리 시설과 규모를 산정하기가 용이하지 않다.

본 연구에서는, 1) 강우 유출수의 특성을 파악하여, 초기강우에 의한 비점오염원의 처리에 중점을 두고 식생여과에 의한 생물저류(bio-retention)와 침투(infiltration)를 이용한 처리 방법의 최적화를 수행하였다. 토양 여재층(media)의 성분 및 구성, 식생 선정 등을 기본모형실험 장치(basic column reactor, BCR)를 통해 수행하였고 이를 기초로 2) 파일럿 규모의 식생 실험 장치에 확대적용(scale-up)하여 처리효율을 분석하였다. 도로변과 주차장에서 각각 채수한 실제의 초기강우 유출수를 적용하여 처리효율을 분석하고 본 연구 결과의 실제 현장에 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 적용한 생물저류와 침투란 육상 호기식물, 토양, 미생물의 복합적인 유기작용, 즉 오염물질의 흡착, 제거, 순환을 통하여 강우 유출수가 여과 및 처리되는 과정을 뜻한다.

본 실험에서 사용된 기본모형실험 장치(basic column reactor, BCR)는 직경 6.5 cm, 길이 45 cm, 두께 5 mm인 아크릴 조와 합성강우 저류조, 교반기, 정량 펌프 등으로 구성되어 있다.

실험에 사용된 식생토양은, 토양 상단, 부엽토, 모래 등의 3단계로 구분하였다. 파일럿 규모의 식생실험 장치는 기본모형실험 장치 실험을 확대적용(scale-up)하여 식생을 식재할 수 있도록 직경 65 cm, 높이 80 cm로 구성하여 실험을 수행하였다. 기본모형실험 장치와 파일럿 규모 식생실험 장치를 Figure 1과 2에 각각 나타내었다.

2.1. 토양 상단과 모래층의 조성 및 성상

US EPA의 생물저류 설계기준에 근거하여 상단 토양을 선정하고 식생이 성장할 수 있는 조건에서 토양 상단의 입도분석과 성상분석을 동시에 수행하였다. 입도분석은 US Soil Con-

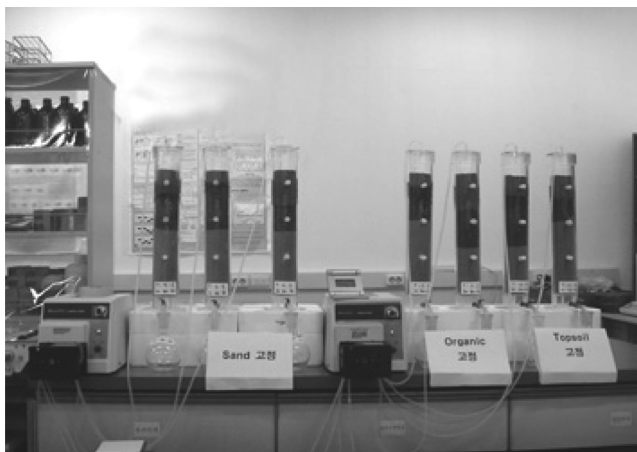


Figure 1. BCR (Basic Column Reactor).



Figure 2. Pilot-scaled bio-retention experimental reactor.

Table 1. Composition of top soil

Group	Sand	Silt	Clay
(%)	79.17	17.56	3.27

Table 2. Chemical properties of top-soil

Group	Sand	Silt
pH range	5.0-7.0	6.47
Magnesium (Mg)	100 + mg/L	4,808 mg/L
Phosphorus (P)	150 + mg/L	178.92 mg/L
Potassium (K)	120 + mg/L	2,232.8 mg/L
Soluble salts	< 900 mg/L	14.8 mg/L

servation Service의 Textual Triangle에 기준하였으며, 체눈의 크기가 2 mm, 1.4 mm, 600 μm, 250 μm, 150 μm, 75 μm 순으로 체거름 하여 무게비로 모래, 토사, 점토를 구분하였다. 입경이 75 μm 이상 되는 입자는 체분석(sieve analysis)을 하였고 그 이하는 Laser Particle Size Analyzer를 이용하여 분석하였다. 토양 상단의 조성을 Table 1에 나타내었다.

상단 토양의 성상분석으로는, pH는 토양시험 공정방법에 따라 용출시험을 거친 후 pH 측정기로 측정하였고 Mg, P, K는 산 처리를 통한 전처리 과정을 거쳐 ICP-MS로 분석하였다. 가용성 염은 HACH사의 DR-4000으로 측정하였다. 모래는 ASTM C-33C 규격에 적합하고 유해 중금속을 함유하지 않은 종류를 선정하였다. 성상분석 결과를 Table 2에 나타내었다.

2.2. 합성강우(synthetic runoff) 제조

본 실험에 사용되는 비점오염원(초기강우 유출수)을 인위적으로 합성제조 하였다. Bacto-peptone, glucose, MgSO₄·7H₂O, MnSO₄·5H₂O, FeSO₄·7H₂O, KCl, (NH₄)₂SO₄, NaHCO₃, CaCl₂를 특정농도로 합성하여 초기강우 유출수를 제조하였다. 합성된 강우의 수질농도는 Table 3과 같다.

Table 3. Concentration of synthetic runoff

Group	BOD	COD _{Cr} ^{a)}	SS	T-N	T-P
(mg/L)	160	237	117	29.7	20.8

^{a)} Chemical oxygen demand, using K₂Cr₂O₇

2.3. 식생선정

식생선정의 제한적 요소는 크게 기후, 내성, 본토(야생)로 구분된다. 염분, 중금속, 오일 및 기름, 해충, 대기오염 등에 내성이 강하고 도로변의 주변경관과 조화를 이루는 식생으로 선정하며 본 실험에 사용된 식생은 3종류로 그 특성은 Table 4와 같다.

3. 실험결과 및 분석

기본모형실험 장치를 이용하여 초기강우 유출수의 최적의 유입유량과 토양 여재 층의 구성 비율을 산정하였으며, 이 결과를 기초로 하여 파일럿 규모의 식생실험 장치를 구성하여 비점오염원의 처리효율을 분석하였다.

3.1. 초기강우 유출수의 유입유량(BCR 실험)

토양 여재 층은 토양 상단, 부엽토, 모래를 각각 20, 30, 50%로 배열하여 구성하였으며 합성강우(초기강우 유출수)의 유입유량을 변화시키면서 유출수의 농도를 분석하여 최적의 유입유량을 도출하였다. BOD 제거효율의 경우, 유입량이 15 mL/min까지 BOD 제거율이 증가되다가 그 이후에는 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다(Figure 3). SS 제거효율의 경우는, 유입량이 21 mL/min까지 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다(Figure 4). BOD와 SS를 동시에 고려하여 최적의 초기강우 유출수의 유입량을 15 mL/min으로 산정하였다.

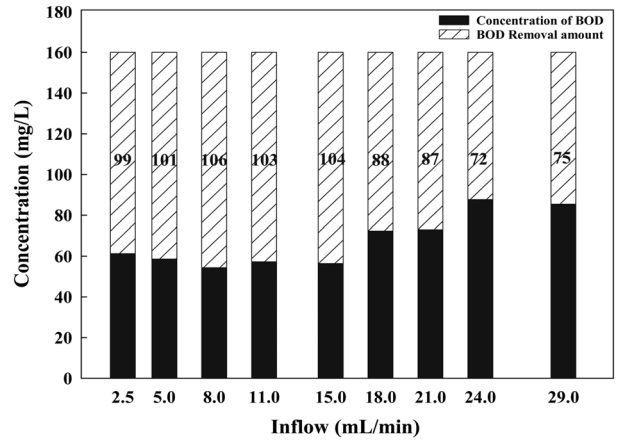


Figure 3. Efficiency of BOD removal with variation of runoff inflow in BCR.

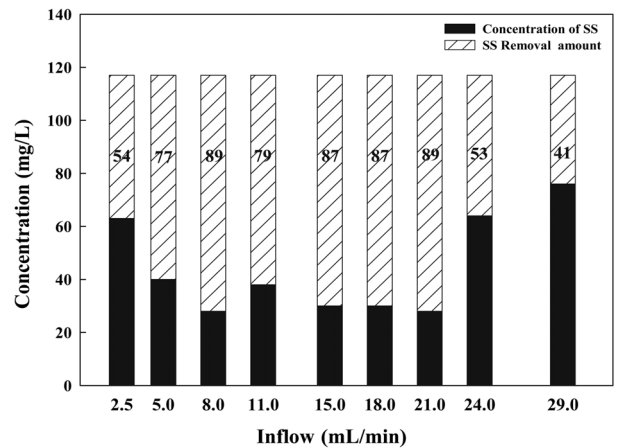


Figure 4. Efficiency of SS removal with variation of runoff inflow in BCR.

Table 4. Recommended plant species in bio-retention study

Species	Moisture regime		Tolerance						Morphology			General characteristic		
	scientific name	Habitat	ponding (day)	Salt	Oil/grease	Metals	Insects disease	Exposure	Form	Height	Root system	Native	Non-native	Wildlife
Common name	Indicator status													
Euonymus alatus Winged euonymous	FAC ^{a)}	Mesic	1-2	H ^{d)}	H	H	M	Sun or shade	Flat dence horizontal branching shrub	5-7	Shallow	-	Yes	No
Juniperus horizontalis Creeping juniper	FAC ^{b)}	Dry Mesic-Mesic	1-2	M ^{c)}	H	H	M · H	Sun	Matted shrub	2-3	Deep taproot	-	Yes	High
Pachysandra terminalis Japanese pachysandra	FACU ^{c)}	Mesic	1-2	-	-	-	M	Shade	Evergreen ground cover	-	Fibrous shallow	-	Yes	Low

^{a)} FAC : Facultative equally likely to occur in wetlands or non-wetlands

^{b)} FACU : Facultative upland - Usually occur in non-wetlands, but occasionally found in wetlands

^{c)} FACW : Facultative wetland - Usually occur in wetlands, but occasionally found in non-wetlands

^{d)} H : High tolerance, ^{e)} M : Medium tolerance

Table 5. Removal efficiency of BCR in top soil (3) : organics (2) : sand (5).

Group (%)	SS	BOD	CODcr	T-N	T-P
	83	72	52	85	90

3.2. 토양 여재 층의 구성 비율(BCR 실험)

앞 절에서 산정된 유입유량 15 mL/min을 기준으로, 토양 상단, 부엽토, 모래 각각의 층의 구성 비율을 변화시켜 총 7개에 대한 사례 연구를 수행하였다. 유입유량을 15 mL/min으로 일정하게 유지하면서 각 구성 비율에 대한 처리효율 분석을 수행한 결과 토양 상단: 부엽토: 모래의 구성 비율이 3:2:5일 때가 가장 처리효율이 우수한 것으로 산정되었다. 전체적으로, 유입 1시간 이후부터는 유출수의 농도가 현저히 감소되는 경향을 보임으로써 실제의 초기강우에 의한 유출수의 농도변화와 유사한 경향을 보여주었다.

Table 5는 토양 상단, 부엽토, 모래의 구성 비율이 3:2:5일 때의 초기강우 유출수의 처리 효율을 보여주고 있다.

3.3. 식생 실험 장치를 통한 초기강우 유출수의 처리효율

기본모형실험 장치 실험을 통해서 도출된 인자 값(초기강우 유출수 유입유량, 토양 여재층 구성 비율)을 적용하여 파일럿 규모로 scale-up된 실험 장치에 식생을 식재한 후, 7일 동안의 적응기간을 거친 후에, 초기강우 유출수의 처리효율을 분석하였다.

기본모형실험 장치 실험에서 산정된 유입유량 15 mL/min의 확대적용 값은 150 mL/min이고 이를, 토양 상단(3) : 부엽토 (2) : 모래(5)로 구성된 토양 여재층에 적용한 결과, 전체적으로 식생을 식재하기 전보다 제거효율이 우수한 것으로 나타났다 (Table 6).

3종류 식생의 평균 제거효율은 SS 88.8%, BOD 83.1%, COD 75.5%, T-N 85.9%, T-P 96.1%로 나타났으며 *Euonymus alatus* 종의 경우, 제거효율이, SS 95%, BOD 86.1%, COD 77%, T-N 91.5%, T-P 95.8%로 분석되어 가장 우수한 처리효율을 보이는 것으로 나타났다.

Table 6. Removal efficiency of plant species in pilot-scaled experiment for synthetic runoff

Division	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	CODcr (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	
Synthetic runoff	117	160	237	39.7	20.8	
Plant species	<i>Euonymus alatus</i>	9	22.15	53.4	2.5	0.86
	<i>Juniperus horizontalis</i>	14	28.19	58.7	4.2	0.64
	<i>Pachysandra terminalis</i>	16	31.21	61.4	5.8	0.91
Average conc. (mg/L)	13.00	27.18	57.83	4.17	0.80	
(%)	88.8	83.10	75.5	85.9	96.1	

Table 7. Removal efficiency of plant species in pilot-scaled experiment for real first rainfall runoff

Division	SS (mg/L)	BOD (mg/L)	CODcr (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)		
Motor way	Inflow	129	44.2	85.2	5.4	4	
	Outflow	0.5	5.6	19.9	1.6	0.39	
	(%)	99.6	87.3	76.6	70.3	90.2	
Parking lot	1	Inflow	299	68.4	95.8	13.2	4.75
		Outflow	1	9.7	21.1	2.3	0.45
		(%)	99.6	85.8	77.9	82.5	90.5
	2	Inflow	134	54.7	72.1	12.4	3.15
		Outflow	1	9.5	16.7	2.1	0.39
		(%)	99.2	82.6	76.8	83.0	87.6
	3	Inflow	108	46.4	59.3	7.2	2.65
		Outflow	0.5	8.0	6.9	1.7	0.36
		(%)	99.5	80.1	88.0	76.3	86.4
Removal efficiency avg.(%)	99.4	82.8	80.9	80.9	88.1		

식생 식재 후에 비점오염물의 제거효율이 증가되는 것은 토양, 미생물, 식생의 복합적이고 유기적인 기능을 통해 흡착, 제거, 순환되는 bio-retention 작용에 기인하는 것으로 보여 진다.

3.4. 실제의 초기강우 유출수를 적용한 처리효율

인위적으로 제조된 합성강우(synthetic runoff) 대신, 실제 현장에서 직접 채수한 초기강우 유출수를 이용하여 3.3절에서의 동일한 실험을 수행하였다.

도로변과 주차장에서 한 강우사상에 대하여 일정시간 간격을 두고 3차에 걸쳐 채수한 원수(raw water)를 분석한 결과, 주차장의 초기강우 유출수 농도가 도로변의 농도보다 더 높은 것으로 나타났다. 각각의 지점에 대한 처리효율 분석결과를 Table 7에 나타내었다.

합성강우를 유입시켰을 경우와 제거효율을 비교하면 두 지점 모두, SS 항목을 제외하곤 약간 낮은 제거율을 보여주고 있다. 전체적으로는 COD 항목을 제외하곤 80% 이상의 비교적 높은 제거효율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 실제의 초기강우 유출수는 합성강우에 비하여 염소농도가 비교적 높고, 주로 토양 여재 층에 부엽토 층에 축적되어 농도분석에 영향을 미칠 수 있고 또한, COD 제거효율이 낮아지는 원인이 될 수도 있다.

4. 결과 및 고찰

미국 환경보호청의 생물저류 방법에 의한 비점오염원 처리의 설계기준에 근거하여, 본 연구에서는 모형 실험장치(BCR)와 파일럿 규모의 식생 실험 장치를 통해 초기강우 유출수에 의한 비점오염원의 제거효율 및 성능을 분석하였다. 모형실험

을 통해 도출한 최적의 설계인자 값을 실제로 식생이 식재된 파일럿 규모의 장치(시설)에 적용하여 도로변과 주차장에서 발생된 초기강우 유출수의 제거효율을 분석한 결과, COD를 제외한 SS, BOD, T-N, T-P 등에서 80% 이상의 제거효율을 보였다. COD의 경우는 유출수 중에 염분농도의 함유로 인해 다소 제거율이 떨어지는 것으로 보였다. 본 연구에서는, 식생의 안정화 기간이 짧고 중금속 성분에 대한 미생물의 흡착, 제거 변환 등에 관한 규명이 제대로 이루어지지 못했다. 또한, 본 연구의 결과를 실제 현장의 처리시설에 반영할 경우, 한계유량 이상의 초기강우 유출수가 유입되거나 예상치 않은 유독성 물질이 유입될 시에 식생이 괴사되어 bio-retention에 의한 처리 기능을 제대로 수행할 수 없는 가능성이 있기 때문에 이를 고려한 성능평가(비점오염농도 삭감량 등)에 관한 연구가 후속으로 수행되어야 한다.

감사

본 연구는 (사)한국용기순환협회의 연구과제의 일부로 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. US EPA, Minimum Standard 3.10-3.11, "General Infiltration Practices and Bioretention Basin Practices," (1999).
2. Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, J. L. H., Choe, J. S., and Yu, M. J., "First Flush Analysis of Urban Storm Runoff," *Sci. Total Environ.*, **293**, 163-175 (2002).
3. Barrett, M. E. Irish, JR, L. B., Malina, Jr., J. F., and Charbeneau, R. J., "Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Arer," *J. Environ. Eng., ASCE*, **124**(2), 131-137 (1998).
4. Lee, S. H. "A Study of soil Environment and Chemical Characteristics of Soil in Kunpo," The Industria Science Research Institute Sang Myung University, 2001.
5. Berbee, R., mRijs, G., Brouwer, R., and van Velzen, L., "Characterization and Treatment of Runoff from Highways in the Netherlands Paved with Impervious and Pervious Aspalt," *Water Environ. Res.*, **71**(2), 189-190 (1999).