

토양칼럼을 이용한 초기우수 중 영양염류의 수변녹지 토양에서의 제거도 평가

윤석표* · 최지용*

세명대학교 환경공학과

*한국환경정책평가연구원

Soil Column Experiment to Evaluate Removal of Nutrients in Stormwater Runoff by Soil of Riparian Protection Zone

Seok-Pyo Yoon · Ji-Yong Choi*

Department of Environmental Engineering, Semyung University

*Korea Environment Institute

(Received 26 January 2004, Accepted 17 February 2004)

Abstract : To investigate removal effects of nutrients in stormwater runoff by soil of riparian protection zone, soil column experiment was conducted for 20 months. Artificial stormwater runoff containing phosphate and nitrate was applied on the surface of soil column twice a week, and phosphate and nitrate concentrations were measured from the leached water.

Soil of riparian protection zone reduced the released amount of infiltrated water to the surrounding water. After infiltration of 1 m depth of soil column, average removal rates of phosphate and nitrate were 97.7 % and 74.7 %, respectively.

As main mechanisms of phosphate are adsorption to soil particle and utilization by plants, periodical replacement of soil and harvesting of plant at the end of growing season are required.

For the removal of nutrients in stormwater runoff by the soil layer, soil of riparian protection zone has higher hydraulic conductivity to infiltrate stormwater. Sandy soil having hydraulic conductivity of about 1×10^{-2} cm/s range might be appropriate for this purpose.

keywords : Soil column, Riparian protection zone, Phosphate, Nitrate, Adsorption, Stormwater runoff

1. 서 론

우리나라는 1980년대 이후 공장폐수, 도시하수와 같은 점오염원의 처리비용은 크게 향상되었으나, 기대한 만큼의 수질개선이 이루어지지 않고 있는데, 이의 한 원인은 비점오염원에 기인하고 있다(최 등, 1999). 비점오염원이란 "면으로 분포하는 오염원으로서 대부분 강우시 유출되는 오염"으로 우리나라에서는 1994년도에 처음으로 중앙정부차원에서 비점오염원에 대한 토지이용별 원단위 조사와 전국적인 오염기여도 조사를 한 바 있다(환경부, 1995).

정부에서는 상수원의 수질을 보전하고 개선시키기 위한 예방대책의 일환으로 수변구역제도를 1998년에 도입하였는데, 수변녹지는 수변구역의 설정에 따른 개발의 억제, 수변의 식생 및 토양층에 의한 자연정화 등의 효과를 기대할 수 있으나, 수변구역 설정에 따른 효과를 계량화한 기초연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 주요 영양물질인 N, P가 수변구역 토양층에서 제거되는 효과를 토양칼럼을 이용하여 조사하였다. 실험실에서 토양칼럼층을 이용하여 인공 강우에 포함한 영양

물질을 표층에 살포하고, 약 1 m 두께의 토양층을 통과한 후의 여액 중의 농도를 약 20개월간 분석하였다. 또한 실험 종료시점에서 토양칼럼 내의 토양시료식물체내에 축적된 총인 농도를 측정하고, 이로부터 영양염류 제거와 관련한 수변구역 토양관리방안에 대하여 논의하였다.

2. 실험방법

2.1. 토양칼럼

수변원충녹지에서의 환경오염물질의 저감 기작은 토양에서의 여과, 흡착, 침전, 식물에 의한 흡수 등 직접적인 요인 이외에도 식생에 따른 강우시 유출계수의 감소와 토양 침식의 저하, 녹지의 경사도 등 간접적인 요인도 관여하므로 매우 복잡하며, 어느 것이 가장 중요한 요인인가를 분리해서 해석하는 것이 쉽지 않다.

이에 본 연구에서는 실험실에서 2차원 토양칼럼층을 Fig. 1과 같이 아크릴로 제작하고, 여기에 인위적으로 제조한 오염된 초기우수를 강우강도를 고려하여 실험 장치 표면에 뿌려서 토양층을 침투하여 하부의 경사면 하류부에서 배출되는 유출수의 양과 오염도를 측정함으로써 토양에서의 오염물질 제거능을 평가하고자 하였다.

* To whom correspondence should be addressed.
yoonsp@semyung.ac.kr

Fig. 1. Soil column experiment apparatus.

토양칼럼은 바닥 및 표면의 경사를 5%로 하였고, 경사면의 길이가 2 m, 토양층의 깊이 1 m, 폭 25 cm로 제작하였으며, 표층에는 야외에서 풀을 채취하여 식재하였다. 토양층의 겉보기 밀도는 당초 1,700 kg/m³이었으나, 지속적인 물다짐 효과에 의해 1,800 kg/m³로 높아졌다. 사용한 토사의 투수계수는 정수위 투수시험방법에 의해 계산한 결과 1.01×10^{-2} cm/s의 값을 보였다. 이 범위 투수계수는 사질토에 해당하는 값이다(Freeze and Cherry, 1979).

실험초기에는 표면에서의 유출수를 채취하고자 하였으나, 사용한 토양이 사질토이고, 토양칼럼 실험장치 표면의 길이가 2 m로 짧아서 표면에 살포한 물의 대부분이 토양층 내로 바로 침투함에 따라 표면유출량은 없었으며, 침투되어 나오는 물의 유량과 수질만을 측정하였으며, 증발산되는 수량은 물질수지를 통해 추정하였다.

2. 영양염류 주입 및 분석

토양칼럼층 표면에 살포한 인공 표면유출수는 사전조사된 강우시 도시지역 표면유출수에 대한 수질 조사 결과에 근거하여(최 등, 2001) 인산염과 질산염을 함유한 증류수를 주 2회 표면에 살포하였다. 토양칼럼에 물을 채우고, 표면에 풀을 식재한 후 일정기간 증류수로 토양층의 수분보유 능력에 해당하는 만큼의 물을 공급한 후 바닥에서 침투수가 발생하기 시작할 때부터 영양물질을 함유한 증류수를 주입하기 시작하였다.

토양칼럼층 표면에 살포한 표면유출수에 해당하는 수량은 기존의 다른 연구자들이 토양 칼럼실험에서 적용한 방법을 준용하여(이 등, 1993) 토양칼럼층의 표면적 (5,000 cm²)에 내리는 연간강수량 중 (J시 최근 10년간 연평균 강수량 : 1,389 mm) 증발산되는 양을 고려하여 55%만이 토양층으로 침투한다고 가정하였으며, 인위적으로 인산염과 질산염을 주입한 조제수를 주 2회 이에 해당하는 수량을 표면에 살포하였다. 초기 강우시의 표면유출수 중의 농도를 고려하여 주입한 질산염과 인산염 이온의 농도는 각각 10 mg/l와 4 mg/l로 하였다.

2.3. 영양물질의 토양 내 흡착/제거 분석

토양칼럼층 층전에 사용된 토사를 이용하여 인산염 이온에 대한 회분식 흡착실험을 시행하였다. 실험에 사용한 인

산염 이온 농도는 기조사된 초기강우시의 인산염 이온 농도 중 최고치를 기준으로 4 mg/l를 채택하였다. 우선 인산염 이온이 토양에 흡착되어 평형에 이르는 시간을 조사하기 위해 건조시킨 흙 10g에 4 mg/l의 인산염 이온이 포함된 물 500 ml를 1ℓ PE병에 넣고, 진탕기에서 200 rpm으로 교반하면서 30분에서 24시간까지 일정 시간 간격으로 시료를 채취한 후 여과액의 인산염 농도를 측정된 결과 1시간 후에는 농도의 변화가 거의 없어서 평형은 1시간 이내에 도달한다고 판단하고, 이를 근거로 토양흡착 시험은 2시간 동안 진탕 후 흡착량을 조사하였다.

5개의 삼각플라스크에 4 mg/l 농도로 제조한 용액 200 ml를 각각 넣고, 건조된 흙을 2, 4, 8, 12, 20 g으로 변화시켜 각 용기에 넣고, 2시간 동안 200 rpm으로 진탕한 후, 상등액을 여과 후 분석하였다. 분석결과는 Freundlich 등온흡착식으로 평가하였다.

한편, 토양칼럼층 하부로 배출되는 유출수는 휴일을 제외하고 매일 발생량과 농도를 측정하여 유출수의 농도로부터 토양층을 통과하면서 제거되는 정도를 조사하였으며, 유량과 농도로부터 물질수지를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 회분식 흡착실험

토양칼럼에 사용된 토사에 대한 인산염 이온의 회분식 흡착실험 결과를 Fig. 2와 같이 Freundlich 등온흡착식으로 나타내었다.

Freundlich 등온흡착식은

$$\frac{x}{m} = KC^{1/n}$$

여기서, x : 흡착된 오염물질의 양 (mg)

m : 흡착제의 양 (g)

C : 평형에 도달한 수용액의 오염물질 농도 (mg/l)

K, 1/n : 실험상수

로서 본 실험에 사용된 토사에 대한 K와 1/n 값은 각각 0.0455와 1.08이 구해졌다. 조 등(2001)의 연구결과와 비교할 때 흡착능을 나타내는 K 값이 상대적으로 작은 것은

Fig. 2. Freundlich isotherm plot for the soil used at the column test.

본 연구에서 사용된 토양이 사질토로서 비표면적이 작는데 기인하는 것으로 생각된다.

3.2. 토양칼럼을 이용한 오염물질 저감 평가

유출수의 발생량은 Fig. 3과 같이 계절적인 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 즉, 2001년의 경우 여름철에 비하여 겨울철에 접어들면서 유출수 발생량이 급격히 증가하고 있는데, 이는 평균기온이 낮아지고, 표면에 식재한 초본류가 가을이 되면서 대부분 고사함에 따라 증발산량이 저감된데 따른 결과이다. 하지만 2002년의 경우 6월 7일 이후 유출

수의 발생이 전혀 없었고, 2003년 2월 17일에서야 유출수가 다시 발생하였다. 이는 해가 바뀌면서 대기를 통해 날아왔거나 토양 내에 본래 존재하던 씨앗의 발아에 의해 첫째에 인공적으로 식재한 초본의 종이 이듬해 다른 종으로 바뀐데 따른 결과로 추정된다. Fig. 4에서는 각 시기별로 촬영한 실험장치의 표면식재 상태를 나열하였는데, 표면식재가 왕성히 자라기 시작한 6월 8일 이후에는 유출수의 발생이 없이 2003년 2월 16일까지 약 8개월간 지속되었다. 12월 이후에도 유출수의 발생이 없었던 것은 토양의 수분 보유능에 의한 것으로 추정된다. 칼럼실험 종료 후 건조된 토사를 이용한 수분보유능 실험에 의하면 건조 토양 중량 대비 41.1 %의 수분을 흡수할 수 있는 것으로 조사되었다.

토양층 하부에서 채취한 침투수의 N, P 농도 측정 결과는 Fig. 5와 6과 같다. 실험기간 중 유출수의 평균 영양물질 제거율은 Table 1에 나타난 것처럼 인산염이 97.7 %, 질산염이 74.7 %로 비교적 높은 비율로 제거되고 있으나, 질산성 질소의 경우 토양 내에서 제거되지 않고 높은 값을 보이는 경우도 어느 정도 있음을 볼 수 있다. 이는 인산염의 경우 토양입자에 흡착되는 성질이 강하나(서 등 1994), 질산성 질소의 제거는 흡착보다는 탈질 등 생물학적 요인에 좌우된다고 판단되며(WEF, 1998; 최 등, 2000), 이러한 측면에서 토양층 내에서의 탈질은 유기물 농도가 한정되어 있으므로 제한적일 수밖에 없을 것이다. 특별히 높은 농도의 유출수 농도를 보이는 경우는 유입수가 관벽을 타고 바

Fig. 3. Generation of leached water during experiment period.

Fig. 4. Changes of surface vegetative status during experiment period.

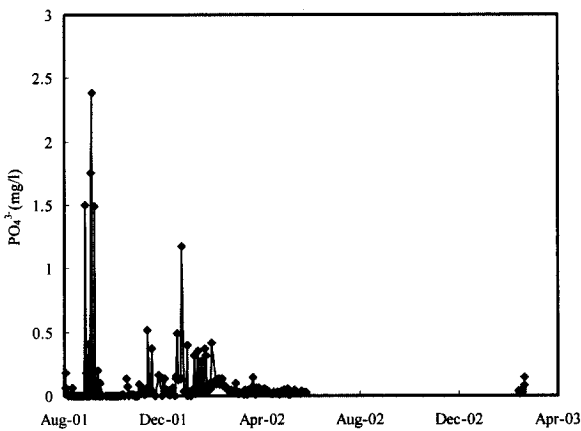


Fig. 5. PO₄³⁻ concentration of leached water from the soil column.

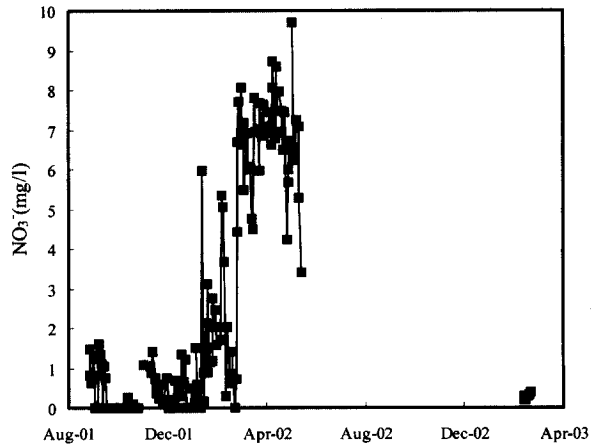


Fig. 6. NO₃⁻ concentration of leached water from the soil column.

Table 1. Nutrients concentrations of leached water

	percentile concentration(mg/ℓ)					average (mg/ℓ)	average reduction rate (%)
	0	25	50	75	100		
PO ₄ ³⁻	ND	ND	0.027	0.055	2.386	0.091	97.7
NO ₃ ⁻	ND	ND	0.87	5.97	9.69	2.53	74.7

로 유출된 결과에도 일부 기인하는 것으로 추정된다.

Table 1에 나타난 유출수 중의 영양물질 제거율은 실제 유출수가 발생한 경우에 대해서만 계산한 것으로서 유출수가 발생하지 않은 경우도 영양물질이 제거된 것으로 간주하면 토양층에 의한 영양물질 제거 효과는 보다 높아진다고 할 수 있다. 하지만, 실제 강우조건과 본 실험에서 적용한 강우조건이 상이하고, 본 실험기간보다 긴 기간동안 실험을 수행하면 유출수가 발생하지 않는 시간이 단축될 수도 있을 수 있으므로 유출수가 발생한 경우에 대해서만 영양물질의 제거효율을 계산하였다.

전체 물수지 측면에서 살펴보면 실험기간 중 주입된 강수량은 총 545.5 L이었으며, 하루로 유출된 침투수량은 128.1 L로서 이로부터 침출계수를 산정하면 주입량의 23.5%가 하루로 침투하여 배출되었다. 나머지 수량은 증발산되거나 토양 내에 보유된 것으로 추정된다.

3.3. 토양칼럼 종료 후 토양 내 총인 농도

실험 종료 후 토양칼럼 2개 지점에서 20cm 깊이별로 총 12개의 토양시료를 채취하여 토양내 인산염 함량을 측정된 결과(Fig. 7) 최상층부의 인산염 함량이 가장 높았고(325.1 mg/kg), 나머지는 낮은 인산염 함량값을 보였다(표층 제외 평균 171.8 mg/kg). 하류부가 다소 높은 것은 벽면을 타고 흘러내린 인공강우에 의한 영향으로 추정된다. 인산염이 포함된 인공강우가 표층에서 살포되었고, 인산염이 제거되는 기작이 주로 흡착에 기인하므로 층별간의 총인 농도 차이는 이와 밀접한 관계가 있을 것이며, 약 20개월간 실험 기간동안 인산염 흡착은 주로 표층에서만 일어난 것을 볼 수 있다.

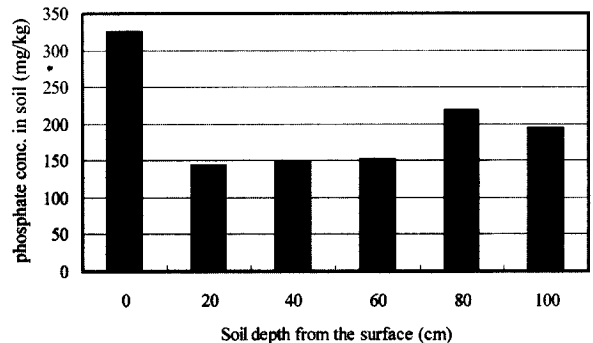


Fig. 7. Adsorbed concentration of PO₄³⁻ along the depth of soil column.

한편, 표면에 식재된 초본류를 실험 종료 후 건조하여 인산염 함량을 측정된 결과 잎과 줄기 부분의 인산염 함량은 9,939 mg/kg, 뿌리 부분의 인산염 함량은 7,718 mg/kg의 농도 값을 보여서 Fig. 7에 나타난 것과 같이 동일 중량의 토양과 비교할 때 식물에 많은 양의 인산염이 축적됨을 알 수 있었다.

3.4. 고찰

수변구역의 설정은 개발을 억제함으로써 수질보전에 기여하는 측면이 크나, 부차적으로 수변구역 자체가 식생 및 토양층에 의한 자연정화의 효과도 갖는다고 할 수 있다(최 등, 2000). 본 연구에서는 이를 실험적으로 실내실험을 통해서 보였으며, 초기우수 중에 포함된 인산염 및 질산염이 토양층을 통과하면서 높은 수준으로 제거됨을 보였다.

이때 주된 제거 기작은 토양층에 의한 흡착, 표면 식생 식물에 의한 생체로의 활용이라고 할 수 있다.

인산염의 경우 토양 입자에 흡착되어 제거되는 것이 주된 제거기작이라고 할 때 입자 크기가 작은 토양이 상대적으로 표면적이 커서 흡착능이 커질 수 있겠으나, 영양물질을 함유한 초기우수가 일단 토양층 내로 침투하여야만 후속의 흡착 과정이 일어날 수 있으므로 지나치게 토사의 입자크기가 작은 토양은 흙의 투수계수가 낮아져서 토양 내로 초기강우가 침투하기 어려워지므로 사질토 계열의 흙이 보다 유리할 것으로 판단된다.

흡착현상이나 식물에 의한 생체증식으로 영양염류가 제거되는 경우는 장기적으로 보았을 때 축적된 인산염의 재방출이 우려되므로 토양 내 축적된 인산염의 재방출이 일어나는 시점에서는 토양층을 교체할 필요가 있다. 실험에 사용한 식물의 인산염 함량 조사 결과에서도 알 수 있듯이 식물은 토양과 비교할 때 높은 함량의 인산염을 흡수하므로 수변녹지 표면에서 자라는 식물을 매년 베어서 제거한다면 수변구역 내에 축적되는 영양염류의 양은 줄어들게 되므로 객토시키는 길어질 것이다.

본 실험에서 사용한 1m 두께의 토사층은 영양염류 제거 효과가 충분히 있었으므로 인위적으로 수변녹지에서 초기우수 제거구간을 설정하고자 하는 경우 일정폭에 대하여 깊이 1m 내외로 비교적 투수계수가 높은 토사층을 두는 방안을 고려할 수 있다. 이때 표면 식재가 된 구역은 유출계수가 작아지고, 뿌리의 침투에 의해 채널이 형성되어 토양의 투수계수가 커지는 효과가 있으므로(Schroeder et al., 1994) 설치 초기에는 인공으로 초본류를 식재하도록 하고, 이후는 자연적인 천이과정을 통해 표면이 식재되도록 함으로써 수변녹지 구역에서 초기우수 중의 영양물질 제거를 도모할 수 있을 것이다.

4. 결론

초기우수 중에 포함된 영양염류가 수변녹지를 통과할 때 제거되는 효과를 조사하기 위해 토양칼럼을 이용한 실험실 실험을 약 20개월 간 수행한 결과는 다음과 같다.

1. 수변구역의 토양은 토양으로 침투하는 강수를 증발산과 토양 내 보유에 의해 강수량이 급격히 배출되는 것을 억제하는 효과를 보였다. 표면 식재 상태에 따라 다르겠으나 본 연구에서는 실험기간 전체를 보았을 때 강수량

의 23.5 %만이 유출수로 발생하였다.

2. 1m의 토양층을 통과한 경우 초기우수 중의 영양염류 제거효율은 인산염이 평균 97.7 %, 질산염이 74.7 %가 제거되어 수변녹지는 초기우수 중의 영양염류 제거 효과가 있음을 알 수 있다.
3. 인산염의 주된 제거는 토양에 의한 흡착과 식물 체내로의 축적에 기인하므로 정기적으로 수변구역 내의 식물을 제거하고, 필요시 표층 토양을 객토하여야 한다.
4. 토양층을 통한 영양물질 제거를 기대하기 위해서는 우수가 토양층으로 침투되어야 하는데, 본 연구에서 수행한 투수계수 1.0×10^{-2} cm/s 내외의 사질토는 우수침투 및 초본식재의 성장 측면에서 적합하였다.

참고문헌

1. 최지용, 신은성, 이동훈, 서울 도시지역의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국물환경학회지, 15(3), pp. 315-323 (1999).
2. <http://www.epa.gov/owow/nps/facts/point1.htm>.
3. 환경부, 비점오염원 조사연구 (1995).
4. Freeze, R.A. and Cherry, J.A., *Groundwater*, Prentice-Hall, Inc., p. 29 (1979).
5. 최지용, 이지현, 도시지역의 수변녹지 조성 및 관리방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, p. 93 (2001).
6. 이인선, 신상철, 정동일, 토양칼럼실험을 통한 비점오염원 오염물질 배출원단위 산정, 수질보전학회지, 9(4), pp. 240-245 (1993).
7. 조성택, 현재혁, 조재범, 나진성, 페콘크리트를 이용한 PO4-P 제거 및 재활용방안, 한국폐기물학회 2001년도 추계학술연구발표회 논문집, pp. 267-270 (2001).
8. 서정범, 윤조희, 임연택, 조광명, 토양의 인 흡착 특성에 관한 동력학적 연구, 수질보전학회지, 한국수질보전학회, 10(4), pp. 421-426 (1994).
9. *Biological and chemical systems for nutrient removal*, Water Environment Federation, p. 399 (1998).
10. 최지용, 정유진, 수질개선을 위한 수변녹지의 조성 및 관리방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, p. 133 (2000).
11. Schroeder, P.R. et al., *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) Model - Engineering documentation for Version 3*, EPA/600/R-94/168b, pp. 15-16 (1994).