

토지의 표면층변화에 따른 비점오염원 관리 및 처리 연구

Study on the non-point source control and treatment with soil surface form

김성원*, 김석구**, 이영아***, 오종민****

Sung Won Kim, Seog Ku Kim, Young Ah Lee, Jong Min Oh

요 지

비점오염은 일정한 오염원 없이 광범위한 지역에 쌓여 있는 오염물질이 강우 등에 의해 산발적으로 유출되는 비점형적인 오염을 말한다. 비점오염물질의 유출은 강우나 해빙에 의해 일시에 다량 발생되어 수계로 빠른 시간 내에 도달되게 되므로 인근 수계환경의 수질에 악영향을 미치게 되며, 이러한 오염물질을 효율적으로 처리하기 위해서는 발생원 가까이에서 수계에 도달하기 전에 저감하거나 유출 과정에서 집수 처리하는 것이 가장 바람직하다.

본 연구에서는 이러한 비점오염물질의 저감을 위해 반응조를 이용한 실내실험을 실시하였다. 실내 실험장치는 아크릴로 제작 되었으며, 제원은 1,000 mm (L) × 150 mm (W) × 300 mm (H)였다. 유입수는 시약을 이용하여 질소와 인의 농도를 고농도와 저농도로 조제하여 사용하였고, 유입은 미량 유량펌프를 이용하여 유입하였다. 토양의 오염물질의 처리 효율이 표면유출보다 하부유출에서 더 좋은 것으로 나타났기 때문에 하부유출의 양을 늘리기 위해 인위적으로 물의 흐름을 막는 정류벽을 설치한 계단형으로 구성하여 직선형과 비교하였다.

연구 결과, 단기간 저농도의 경우 T-N, T-P 부분에서 보면 직선형과 계단형의 표면유출에서의 저감 효율이 T-N은 각각 -2.6 %, 2.4 %, T-P는 각각 -11.0 %, 52.9 %로 표면유출수의 오염저감효과가 개선되는 것으로 나타났다. 이는 방류벽 앞에 하부로 침투되었던 물이 표면으로 유출되면서 오염물질의 저감이 일어났기 때문으로 판단된다. 반면, 단면 및 하부유출수의 오염물질 농도는 증가한 것으로 나타났다. 이는 토양내의 입경이 작은 silt나 clay보다 입경이 큰 모래나 자갈을 경유 하면서 오염물의 저감효과가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 유입유량의 대부분이 표면으로 유출된다는 점을 고려할 때 표면유출수의 오염도를 낮추는 것이 유입오염물 저감효과에 보다 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 비점오염, 토양, 표면유출, 하부유출

1.서론

하천의 수변지역이 확보된 지역에서는 하천의 생태계를 유지하면서 비점오염원에 의한 수질악화를 방지할 수 있는 생태 공학적 기술의 개발이 필요하다. 이러한 생태 공학적 처리방법으로는 식생여과대가 유력한 방법으로 판단되며 이에 대한 적용기술의 개발을 위해서는 필요한 인자들(식생종, 식생대의 크기, 저감작용의 메커니즘, 적정 부하량, 유출특성 등)에 대한 연구가 현장에서 확보될 필요가 있다.

* 비회원경희대학교 환경응용과학과 석사과정-E-mail : 2ksw213@naver.com
** 정회원.한국건설기술연구원 수석연구원-E-mail :
*** 비회원경희대학교 환경연구센터 연구원-E-mail :
**** 정회원경희대학교 환경응용화학부 교수(corresponding author)-E-mail : jmoh@khu.ac.kr

2. 연구 방법

2.1 실내 실험 장치

실내 실험장치는 아크릴(두께 : 10 mm)로 제작되었으며, 제원은 1,000 mm (L) × 150 mm (W) × 300 mm (H)이다. 유입수는 시중에 판매되는 시약(KH₂PO₄, KNO₃, NH₄Cl)을 이용하여 질소와 인의 농도를 조절하여 사용하였고, 유입은 미량유량펌프(Masterflex, Model 7529-00)를 이용하여 500 ml/min의 속도로 유입하였다. 유출수는 표면유출과 표면하유출을 나타내는 단면유출, 지하유출을 나타내는 하부유출에 대하여 각각의 수질정화능력을 평가해 볼 수 있도록 채취하였고, 시료의 분석은 유입 후 4시간에 걸쳐 30분내지 2시간 간격으로 시료를 채취하여 실시하였다.



그림 1. 하부유출을 늘이기 위해 설계된 반응조

2.2 실험조건 및 실험방법

본 연구에서는 식생대의 표면층에 따른 유출수의 오염물 농도 변화 및 저감효율에 실험을 실시하였다. 이에 따른 각 실험방법 및 실험조건은 다음과 같다.

2.2.1 표면층 변화에 따른 유출농도 변화

본 연구에서 표면층의 변화는 직선형과 계단형으로 구성되었다. 직선형은 일반적인 토양층의 구조를 의미하며, 계단형은 구간별로 인위적인 방류벽을 설치하고 방류벽 앞에는 자갈과 모래로 층을 쌓아 물의 토양 내 침투량을 증가시킬 수 있는 구조로 조성되었다. 실험조건은 표면을 돌미나리로 식재하였고, 실험시간은 4시간과 48시간으로 단기간과 장시간에 걸친 오염물의 유출농도를 관찰하였으며, 샘플 채취시간은 단기간의 경우 30분 간격, 장기간의 경우 2시간 간격으로 실시하였다.

2.2.2 실험항목 및 실험방법

실험항목은 기본 항목으로 수온, pH, EC를 측정하였고, 유기물은 TOC를 대상으로 측정하였으며, 영양물질인 N, P 계열의 농도저감 및 이동특성을 파악하기 위하여 T-N, NH₄-N, NO₂-N, NO₃-N, T-P, PO₄-P에 대한 유입 및 유출수의 농도를 분석하였다. 이들 항목에 대한 분석방법은 표 1에 자세히 나타내었다.

표 1.수질분석 항목 및 실험방법

항목	Analysis method
수온	pH meter (ORION, 520A)
pH	pH meter (ORION, 520A)
EC	EC meter (ISTEC, 430C)
TOC	TOC meter (Shimadzu, TOC 5000A)
T-N	자외선 흡광광도법 (220nm) (UV 1601PC, Shimadzu, Japan)
NH ₃ -N	흡광광도법 (인도페놀법 - 630nm) (UV 1601PC, Shimadzu, Japan)
NO ₃ -N	흡광광도법 (부르진법 - 410nm)
NO ₂ -N	흡광광도법 (디아조화법-540nm)
T-P	흡광광도법 (아스코르빈산 환원법 - 880nm)
PO ₄ -P	흡광광도법 (아스코르빈산 환원법 - 880nm)

3. 실험결과

본 연구에서는 단면 및 하부유출의 양을 늘리기 위하여 침투량을 증가시킬 수 있도록 인위적으로 물의 흐름을 막는 정류벽을 설치하였고, 정류벽의 앞에는 자갈과 모래를 이용하여 물이 침투된 후 유하할 수 있도록 실험조건을 설정하여 실험을 실시하였다. (그림 1)

먼저 단기간의 저농도 및 고농도에 있어서 유입수의 수온은 7.0~16.4 °C의 범위에 평균 11.8 °C로 조사되었고, 유출수는 4.7~16.7 °C의 범위에 평균 11.2 °C인 것으로 조사되었다. pH는 유입수 평균이 6.62였으며, 유출수의 전체 평균이 7.22로 조사되었다. 또한 EC는 유입수의 평균이 991 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이었으며, 유출수의 전체 평균은 909 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 인 것으로 나타나 유출과정에서 감소하였다. 장기간에 있어서, 저농도 및 고농도의 평균 수온은 12.8 °C로 나타났고, 유출수 전체 평균은 12.0 °C로 나타났으며, pH는 유입수 평균이 6.53이었고, 유출수 전체 평균이 7.18인 것으로 조사되었다. EC에 있어서는 유입 평균이 981 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 인 것으로 나타났고, 유출수 전체 평균은 968 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 인 것으로 조사되었다.

표 2. 단기간의 수온, pH, EC 측정결과

구분		수온(°C)		pH		EC	
		범위	평균	범위	평균	범위	평균
저농도	유입	7.0~16.4	11.7	6.58~6.67	6.63	778~875	827
	표면유출	6.6~16.4	11.8	6.92~7.02	6.96	770~896	823
	단면유출	5.2~16.7	11.2	7.06~7.36	7.20	670~928	815
	하부유출	5.1~16.7	11.3	7.4~7.83	7.54	725~1,043	864
고농도	유입	7.8~16.0	11.9	6.58~6.62	6.60	1,099~1,211	1,155
	표면유출	6.8~15.9	11.7	6.83~7.05	6.94	1,077~1,234	1,144
	단면유출	4.7~15.7	10.7	7.02~7.36	7.11	691~1,085	930
	하부유출	4.9~15.6	10.7	7.28~8.01	7.58	716~1,078	880

표 3. 장기간의 수온, pH, EC 측정결과

구분		수온(°C)		pH		EC	
		범위	평균	범위	평균	범위	평균
저농도	유입	11.3~14.3	12.8	6.49~6.62	6.56	805~837	821
	표면유출	9~14.8	12.5	6.73~7.15	6.81	782~853	826
	단면유출	8.85~14.4	12.1	6.81~7.14	6.98	742~874	828
	하부유출	7.8~14.5	11.3	7.55~8.33	7.86	745~998	907
고농도	유입	11.0~14.4	12.8	6.46~6.52	6.49	1,113~1,167	1,140
	표면유출	9.4~15.0	12.7	6.65~6.97	6.78	1,090~1,186	1,135
	단면유출	8.0~14.7	12.2	6.80~7.15	6.92	904~1,141	1,080
	하부유출	8.1~14.2	11.3	7.50~8.13	7.76	758~1,230	1,032

3.1 단기간의 저농도

실험시간을 4시간으로 한 경우의 직선형과 계단형 반응조의 유출수별 오염물질 저감효과를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 보면, 직선형의 경우 표면 유출에 대한 TOC 저감효과는 -1.5 %로 나타난 반면, 계단형은 3.3 %인 것으로 나타나, 계단형에서 TOC 저감효과가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 계단형의 경우 표면의 정류벽에 의한 막힘 현상으로 유속을 반감시키고 침투량의 일부가 정류벽을 통과한 후 재상승하여 표면으로 유출되기 때문에 저감효과가 높게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 경향은 T-N 및 T-P에서도 나타나 각각 표면유출에서의 농도는 직선형이 -2.6 %, -11.0 %인데 반하여, 계단형에서는 2.4 %, 52.9 %로 저감효율이 월등히 높다. 그러나 단면 및 하부에서는 이와 반대로 직선형에서 대체로 측정항목에 대한 저감효과가 높게 나타났다. 이는 토양용액의 물리적, 화학적 자정작용이 토양의 토성이나 공극에 크게 작용을 받기 때문으로, 본 실험에서 인위적으로 공급해준 자갈이나 모래는 일반적으로 공극 및 비표면적, 오염물질에 대한 흡착능력이 토양 중의 실트 및 점토입자에 비하여 떨어지기 때문에 저감효과가 감소한 것으로 판단된다. 따라서 계단형에서는 직선형에 비하여 단면 및 하부유출에서의 오염물질 저감효과가 떨어진 것으로 판단된다.

표 4. 유출수별 저감효율 (단기간-저농도)

구분		TOC (%)	T-N (%)	NO ₃ -N (%)	NH ₄ -N (%)	T-P (%)	PO ₄ -P (%)
직선형	표면유출	-1.5	-2.6	14.4	21.3	-11.0	-7.2
	단면유출	61.6	62.1	42.4	95.8	91.9	94.5
	하부유출	100.0	71.2	64.1	85.5	88.0	84.5
계단형	표면유출	3.3	2.4	7.4	38.7	52.9	48.8
	단면유출	54.7	38.3	44.6	86.1	94.9	98.0
	하부유출	100.0	56.8	65.4	48.2	92.3	93.9

3.2 단기간의 고농도

단기간 동안 측정된 고농도의 오염물질 농도변화에 대한 결과에서, TOC, T-N, T-P의 표면유출에 대한 저감효과는 계단형이 직선형보다 월등히 높은 것으로 나타나 앞서의 저농도와 같은 결과를 보였다. 이는 저농도에서 설명된 것과 마찬가지로 표면유출량의 일부가 토양 하부층을 통과한 후 월류되는 과정에서 오염물질의 일부가 저감되었기 때문으로 판단된다. 또한 저농도와 마찬가지로 단면 및 하부유출에서는 TOC, T-N 농도가 계단형에서 더 높은 것으로 나타나 저감효율은 떨어졌다. T-P는 계단형과 직선형 모두에서 단면 및 하부유출의 저감효과가 95 % 이상으로 나타났다. 이는 T-P 계열에 대한 토양층의 강한 흡착능력에 기인한 것으로 판단되며, 따라서 식생여과대를 적절히 이용하는 것만으로도 부영양화의 중요한 영향 물질인 T-P의 저감효과는 충분할 것으로 판단된다.

표 5. 유출수별 저감효율 (단기간-고농도)

구분		TOC (%)	T-N (%)	NO ₃ -N (%)	NH ₄ -N (%)	T-P (%)	PO ₄ -P (%)
직선형	표면유출	2.2	-5.7	39.5	95.3	-0.5	4.0
	단면유출	57.1	40.7	43.5	96.9	97.6	97.8
	하부유출	100.0	63.2	66.3	98.5	97.6	98.0
계단형	표면유출	12.0	15.9	36.4	74.5	10.9	25.5
	단면유출	51.9	31.0	48.9	77.4	94.0	96.5
	하부유출	100.0	56.2	61.9	84.1	98.1	98.3

3.3 장기간의 저농도

본 실험은 비교적 장기간에 강우가 집중될 수 있는 경우를 상정하여 48시간 연속하여 유입수를 투여하고 2시간 간격으로 샘플을 채취하여 측정하였다. 먼저 표면유출의 경우, TOC는 직선형이 12.4 %, 계단형이 3.0 %로 나타나 직선형의 처리효율이 계단형 보다 높게 조사되었다. 이는 앞서 단기간의 실험과 상반된 결과로, 계단형의 저감효율이 감소했다기보다는 직선형의 결과가 좋게 나왔기 때문으로 판단된다. 또한 T-N의 경우, 표면유출에서는 계단형의 저감효과가 높게 나타났으나, 단면 및 하부유출에서는 직선형의 저감효율이 높게 나타나 단기간과 비교적 일치하는 결과를 보였다. 그러나 T-P에 있어서는 표면유출에서 직선형의 저감효과가 높은 것으로 나타난 반면 단면 및 하부유출에서는 계단형이 높게 나타났다. 시간의 경과에 따른 유출수의 농도변화를 보면, 대체적으로 직선형의 유출수 농도변화가 크게 나타나 안정적인 처리측면에서는 계단형이 유리할 것으로 판단된다.

표 6. 유출수별 저감효율 (단기간-고농도)

구분		TOC (%)	T-N (%)	NO ₃ -N (%)	NH ₄ -N (%)	T-P (%)	PO ₄ -P (%)
직선형	표면유출	12.4	37.4	31.2	90.0	14.6	55.9
	단면유출	55.4	44.5	9.7	96.7	81.5	93.6
	하부유출	98.8	64.5	44.9	97.2	84.1	89.2
계단형	표면유출	3.0	39.8	6.1	53.9	3.6	91.4
	단면유출	50.7	35.7	24.6	84.6	95.5	96.6
	하부유출	96.2	32.1	29.7	87.2	98.1	96.7

3.4 장기간의 고농도

고농도의 표면유출에 있어서, TOC는 저농도와 마찬가지로 직선형에서의 저감효과가 계단형보다 더 높은 것으로 나타났으나, 그 차이는 각각 17.8 %, 17.1 %로 0.9 %의 차이밖에는 없었다. 이는, 유출수의 시간에 따른 농도변화를 보면, 35시간 이후 직선형의 유출수 중 TOC 농도가 크게 낮아졌기 때문으로 장시간 경과 후 직선형의 표면유출수 중 TOC의 농도는 크게 저감된 것으로 나타났다. T-N 및 T-P에서는 계단형에서 저감효과가 직선형보다 대체로 높게 조사되었다.

표 7. 유출수별 저감효율 (단기간-고농도)

구분		TOC (%)	T-N (%)	NO ₃ -N (%)	NH ₄ -N (%)	T-P (%)	PO ₄ -P (%)
직선형	표면유출	17.8	28.9	15.0	80.1	8.7	-4.9
	단면유출	52.7	63.8	73.5	84.7	97.1	98.1
	하부유출	83.4	76.2	63.3	93.3	98.8	98.4
계단형	표면유출	17.1	39.7	40.2	45.1	11.7	10.5
	단면유출	70.5	77.9	75.7	75.7	79.6	88.8
	하부유출	87.5	61.7	53.5	71.7	96.6	99.4

4. 결 론

오염물질의 저감효과는 표면에서보다 하부나 단면유출에서 월등히 높은 것으로 나타나 수변식생대의 구성에 있어서 단면 및 하부유출량을 극대화할 필요가 있을 것으로 판단된다. 이러한 목적으로 토양 표면층을 계단형으로 설정하여 실험을 해 본 결과, 표면유출수의 오염저감효과가 개선되는 것으로 나타났다. 이는 방류벽 앞에서 하부로 침투되었던 물이 표면으로 유출되면서 오염물질의 저감이 일어났기 때문으로 판단된다. 반면, 단면 및 하부유출수의 오염물질 농도는 증가한 것으로 나타났는데, 이는 토양내의 입경이 작은 silt나 clay보다 입경이 큰 모래나 자갈을 경유하면서 오염물질의 저감효과가 감소한 것으로 판단된다. 그러나 유입유량의 대부분이 표면으로 유출된다는 점을 고려할 때 표면유출수의 오염도를 낮추는 것이 유입 오염물 저감효과에 보다 큰 효과가 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 지원으로 이루어 졌으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김윤태(2000). 수생식물을 이용한 영양염류 제거에 관한 연구, 창원대 대학원 석사학위논문, p8
2. 현진이(1999), 하천 식생 복원을 위한 식재기준 설정에 관한 연구: 경기도 남양주군 수입천을 대상으로, 경원대학교, p16-31