



다공성 경량골재 및 순환골재를 이용한 비점오염원 저감시설의 처리효율 평가

Evaluation of the Non-point Source Treatment Facility using the porous lightweight aggregate and the recycled aggregate

강영현^{1*} · 장대창² · 강선홍²

Young-Heoun Kang^{1*} · Dae-Chang Jang² · Seon-Hong Kang²

1 녹스코리아(주), 2 광운대학교 환경공학과

(2009년 10월 15일 접수, 2009년 10월27일 채택)

Abstract

This study intends to evaluate the efficiency of non-point source reduction technique by using the porous lightweight and recycled aggregate which microorganism is seeded.

In case of infiltration velocity 30~70 mm/hr in high concentration of influent, it is indicated that SS was 40~94%, COD 44~91%, BOD 4~91%, TN 1.2~66%, TP 7~70% of removal efficiency. Removal efficiency is good in infiltration velocity 30 > 50 > 70mm/hr order.

Therefore, the non-point source treatment facility filled with lightweight and recycled aggregate using microbial seeding shows higher removal efficiency than a conventional sand and gravel. We confirm that the function and efficiency are improved significantly and applied to treat non-point sources.

Key words : Non-point source, Infiltration, *Bacillus subtilis*, Removal efficiency

주제어 : 비점오염원, 침투, 바실러스 섭틸러스, 제거효율

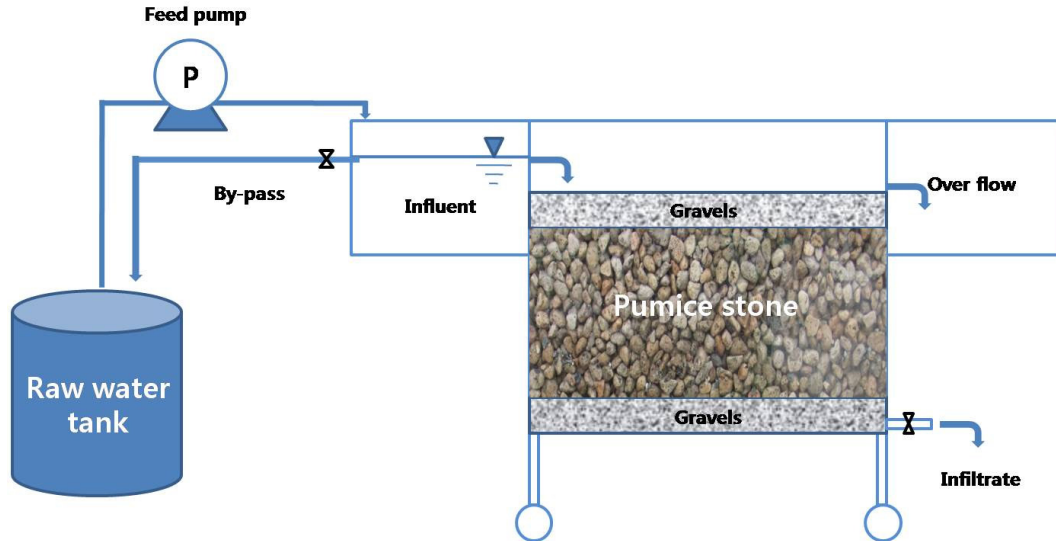
1. 서론

비점오염원이란 오염물질이 주로 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로써 도시지역의 먼지와 쓰레기, 농지에 살포된 비료 및 농약, 토양침식물, 축사유출물, 자연 동식물의 잔여물, 대기오염물질의 강하물 등을 말한다. 비점오염물질은 일반적으로 강우시 유출되기 때문에 일간계절간 배출량 변화가 크고 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건·지질·지형 등에 영향을 많이 받는 특성을 지니고 있다. 우리나라의 경우 기상학적으로 년평균

강우량의 약 70%가 여름철에 집중되고 최근 급속한 산업화로 인해 도시지역내의 불투수 면적이 증가함에 따라 강우시 유출량이 일시에 하천으로 유입되어 홍수의 피해와 비점오염원에 의한 수질오염을 가중시키고 있다(최지용 외, 2002).

현재 비점오염원을 저감시키기 위한 방안으로는 저류시설, 인공습지, 침투시설, 여과시설, 식생수로 등이 있다. 저류시설, 인공습지 등은 넓은 부지를 필요로 하는 단점이 있고 여과시설의 경우 여재의 폐쇄로 인한 여재 교체 등의 유지관리를 필요로 한다. 또한 기존 침투식의 경우 모래와 자갈을

* Corresponding author Tel:+82-2-504-5892, Fax:+82-2-504-5894, E-mail: ka9838@naver.com(Kang, Y.H.)



이용하여 단순히 여과시킴으로써 비점오염물질에 의해 지하수의 2차 오염이 발생할 수 있다. 선행 연구결과에 의하면 식생여과대에 비해 토양층을 변화시켜 토양의 침투능을 향상시킨 토양여과대가 비점오염물질 저감에 보다 효과적이라는 연구결과가 발표 되었다. 토양 여과대에 대한 오염물질 저감효과를 규명하기 위해 모래+자갈, 발포프로필렌, 다공성 스폰지 등 여러 가지 형태의 여재를 활용한 연구들이 진행되어 왔다(김석구, 2004).

본 연구에서는 비점오염저감시설 중 침투시설의 단점을 보완하고자 강우시 발생하는 비점오염원을 미생물이 식종된 다공성 경량골재 및 순환골재를 이용하여 미생물에 의한 유기물 제거와 다공성 골재의 흡착능력을 통한 비점오염원 저감기술을 적용 그 효율성을 평가하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 침투시설의 실험장치는 Fig. 1과 같이 전면부는 아크릴로, 후면과 측면은 철골구조로 유역면적 5 m², 설계 강우량 5mm로 설정하여 80cm(L) × 50cm(W) × 100cm(H)의 크기로 제작 하였으며 전후단에 유입부와 유출부를 설치하였다. 또한 시료 채취를 위하여 하단은 약 5% 경사를 두고 그 상부에 내경 10mm의 다공관을 설치하여 처리수를 하부에서 채취가 가능하도록 제작하였다. 침투시설의 처리효율은 장치내 여재 종류에 따라 영향을 많이 받는다. 따라서 본 연구에서는 모래+자갈, 다공성 경량골재 및 순환골재로 분리하여 실험을 실시하였다. 장치내 여재 충전은 하단부에 자갈을 10cm 충전하고 그 상단에 모래+자갈을 혼

합하여 60cm 충전 후 다시 상부에 10cm의 자갈을 충전하였다. 다공성 경량골재 및 순환골재 또한 장치의 상하부는 동일하게 하고, 모래+자갈층 대신 다공성 경량골재 및 순환골재를 충전하여 진행하였다.

2.2 다공성 경량골재 및 순환골재

본 연구에 사용될 다공성 경량골재는 부석(Pumice Stone)으로 액상 상태로 분출하여 결정화되지 못할 정도로 매우 빠르게 식은 화산암으로 식을 당시에 포함되어 있던 가스들이 갑자기 빠져나가면서 생성된 거품모양의 작은 글라스 방울들이 암석 전체에 존재한다. 이 다공질 구조 때문에 부석은 매우 가볍고, 방열과 방음특성 및 구조적 강도를 갖고, 또한 화학적으로 매우 안정하고 열에도 강하고, 경량인 특성을 가지고 있다.

건설폐기물을 이용하여 생산한 순환골재는 재생시 파쇄 과정을 거치며 골재내 공극이 형성된다. 순환골재의 공극 또한 미생물의 서식처 공간으로 충분하며, 자원의 재순환 측면에서 바람직 할 것으로 판단되어 본 연구에 적용하였다.

Table 1. Chemical compositions of Pumice Stone

Silica	SiO ₂	61.30%
Iron Oxide	Fe ₂ O ₃	2.12%
Aluminium Oxide	Al ₂ O ₃	19.14%
Calcium Oxide	CaO	5.44%
Magnesium Oxide	MgO	0.36%
Sulphate	SO ₃	nil
Potassium Oxide	K ₂ O	3.51%
Sodium Oxide	Na ₂ O	5.80%
Loss on Ignition including CO ₂		2.30%

Table 2. Water analysis items and methods

분석항목	분석방법
수온	Mercury thermometer
pH	pH meter(HI8424-HANA)
DO	DO meter(DO-5511)
SS	Vacuum Filtration (Glass Fiber Filter, GF/C)
BOD ₅	Azide Modification
COD _{Mn}	Closed Reflux, Titrimetric Method
T-N	Ultraviolet Spectrophotometric Method
T-P	Ascorbic Acid Method

Table 3. Characteristics of influent water quality

원수	유입수질(mg/L)				
	SS	BOD ₅	COD _{Mn}	TN	TP
과천시 환경 사업소 방류수 (LOW)	5.8	3.4	12.5	9.9	0.9
인공 우수 (HIGH)	150	50	100	10	3



Fig. 2. *Bacillus subtilis*(×1,000)(L), Seeding pumice stone and recycled aggregate(C) and SEM(×5k)

2.3 식중 미생물

*Bacillus subtilis*는 식물잔사 등의 유기물 분해 능력이 매우 우수한 미생물로서, 토양내 서식하는 대표적인 유효미생물이다. 또한 병원균 생육을 억제하는 항생물질을 다량 분비하여 토양내 병원균의 밀도를 낮추어줄 뿐 아니라, 각종 생리활성물질을 분비하여 식물의 지하부 생육을 촉진시키는 기능 또한 뛰어나다. 유기질이 풍부한 토양일수록 이 균의 밀도가 높고, 이 균의 밀도가 높은 토양은 병해억제형 토양이라고 할 수 있다. 이러한 특성을 가지는 *Bacillus subtilis*는 생물학적 산화에 의해 유기물을 소모하여 에너지로 이용한다.

3. 실험방법

여재내 미생물의 식중은 10¹⁰ CFU/mL로 배양된 액상의 *Bacillus subtilis* 미생물을 다공성 경량골재 및 순환골재에 침적하여 pH 6.5, 온도 35°C 조건하에서 10일간 식중을 실시하였고 식중된 다공성 경량골재 및 순환골재를 전자현미경으로 관찰하여 식중여부를 관찰하였다. 수질분석은 유입유량을 2.5L/min로 유입시키고, 침투속도가 30mm/hr, 50mm/hr, 70mm/hr이 되도록 유출량을 조절하여 초기 30분은

5분 간격으로 하고, 30분 이후부터는 30분 간격으로 실시하여 24시간 동안 실시하였다. 분석항목은 SS, BOD₅, COD_{Mn}, TN, TP를 대상으로 하였고 **Table 2**의 분석방법을 통해 실험하였다(환경부, 2007). 실험에 사용된 유입원수는 강우시 비점오염원의 발생농도와 유사한 실험조건을 부여하기 위해 저농도를 가지는 과천시 환경사업소의 방류수와 고농도의 원수 유입실험을 위해 Soluble Starch, (NH₄)₂SO₄, NaNO₃, KH₂PO₄를 이용하여 인공우수 600 L를 제조하여 실험을 실시하였다(**Table 3**).

4. 결과 및 고찰

4.1 기존 모래+자갈 여재 및 미 식중 여재와의 처리효율 비교

기존 침투식 처리시설의 여재인 자갈+모래는 24시간 경과 후 SS의 처리효율이 81%로 나타났으며 COD 35%, BOD 25%, TN 22%, TP 25%의 처리효율 보여 고형물과 유기물질만이 다소 제거 되었을 뿐 용존성 영양물질에 대해서는 처리효율이 미미한 것으로 나타났다. 미 식중된 여재의 처리효율은 24시간 경과 후 SS 91%, COD 56%, BOD 35%, TN 32%, TP 52.4%로 모래+자갈 여재보다 높은

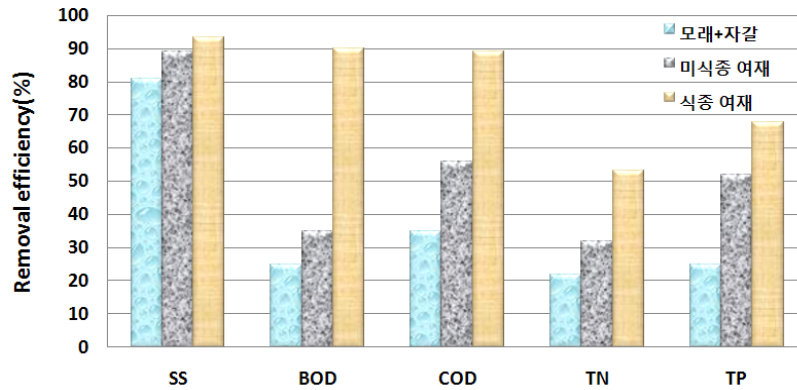


Fig. 3. Removal efficiency as a function of experimental media

처리효율을 보였다. 이는 다공성 경량골재 및 순환골재의 공극으로 인해 흡착작용이 작용한 것으로 판단된다. 식중된 여재의 경우 24시간 경과후 처리효율을 기준으로 SS 93.3%, COD 89.2%, BOD 90%, TN 53.2%, TP 67.7%로 양호한 처리효율을 보이고 있다. 이를 통해 식중된 미생물이 용존성 영양물질을 에너지원으로 소모하여 제거되고 다공성 경량골재 및 순환골재 공극에 의한 흡착으로 처리효율이 다른 여재보다 높은 것을 알 수 있었다(Fig. 3).

4.2 침투속도에 따른 처리효율 비교

침투식 비점오염저감시설은 대상지역 토양의 침투속도가 오염물질의 정화작용에 큰 영향을 미친다. 환경부의 비점오염저감시설의 설치 및 운영 매뉴얼에서는 시간당 13~210 mm의 침투속도를 준수하도록 하고 있다(환경부, 2008). 따라서 본 연구에서는 하루의 유량조절 밸브를 이용하여 침투속도가 30 mm/hr, 50mm/hr, 70mm/hr이 되도록 조절하여 실험을 실시하였다. 또한 원수의 유입농도별 처리효율을 분석

하기 위해 저농도와 고농도의 원수를 이용하여 실험하였다. 저농도/고농도 실험을 실시한 결과 저농도의 COD는 경량골재내 미생물 식중시 액상배지에 포함된 영양물질이 유입되어 원수농도보다 높아 실험결과에 영향을 끼쳐 농도가 증가하는 것으로 나타났고 실험이 진행됨에 따라 일정수준 안정화되는 추세를 보였다. 따라서 향후 미생물의 식중방법에 대한 고찰과 일정기간의 안정화가 필요할 것으로 보인다.

침투속도에 따른 저농도/고농도 처리효율 결과를 보면 30 mm/hr의 경우 저농도의 처리효율은 SS 29.6~88.9%, BOD 2.9~64.8%, TN 34.6~63.1%, TP 35.3~67.6%로 나타났으며, 고농도는 SS 40.0~93.7%, COD 53.5~91.1%, BOD 10.0~91%, TN 2.6~65.8%, TP 16.3~69.7%의 처리효율을 보였다(Fig. 4, Table 4). 침투속도 50mm/hr의 경우 저농도에서 처리효율은 SS 34.6~88.5%, BOD 5.3~57.1%, TN 32.3~58.5%, TP 11.8~38.2%로 나타났고 고농도에서 의 처리효율은 SS 40.0~94.5%, COD 43.5~89.8%, BOD 4.0~82.3%, TN 3.5~44.1%, TP

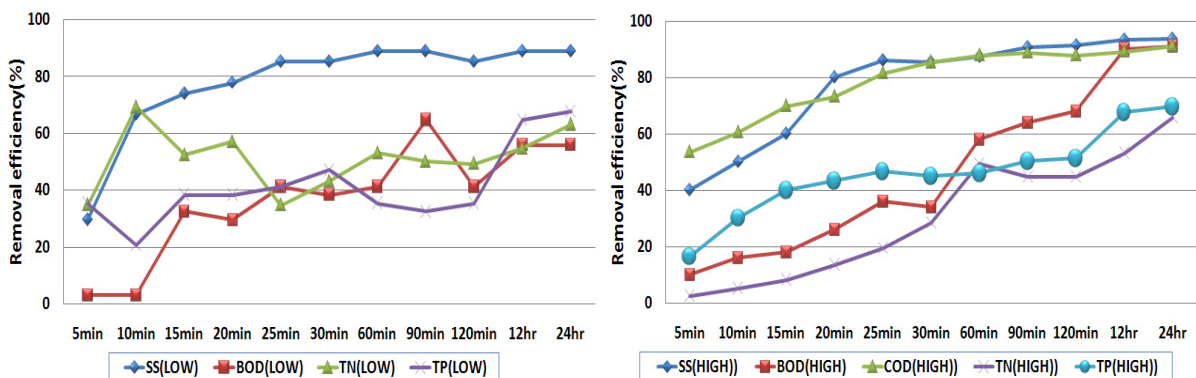


Fig. 4. Removal efficiency as a function of low and high concentration influent(infiltration velocity 30mm/hr)

Table 4. Removal efficiency as a function of elapsed time at infiltration velocity 30mm/hr

unit:%

	5min	10min	15min	20min	25min	30min	60min	90min	120min	12hr	24hr
SS(LOW)	29.6	66.7	74.1	77.8	85.2	85.2	88.9	88.9	85.2	88.9	88.9
BOD(LOW)	2.9	2.9	32.4	29.4	41.2	38.2	41.2	64.7	41.2	55.9	64.8
TN(LOW)	34.6	69.2	52.3	56.9	34.6	43.1	53.1	50.0	49.2	54.6	63.1
TP(LOW)	35.3	20.6	38.2	38.2	41.2	47.1	35.3	32.4	35.3	64.7	67.6
SS(HIGH)	40.0	50.0	60.0	80.0	86.0	85.3	87.3	90.7	91.3	93.3	93.7
BOD(HIGH)	10.0	16.0	18.0	26.0	36.0	34.0	58.0	64.0	68.0	90.0	91.0
COD(HIGH)	53.5	60.5	70.0	73.3	81.6	85.4	87.9	88.8	87.9	89.2	91.1
TN(HIGH)	2.6	5.3	8.4	13.7	19.5	28.4	49.5	44.7	44.7	53.2	65.8
TP(HIGH)	16.3	30.0	40.0	43.3	46.7	45.0	46.0	50.3	51.3	67.7	69.7

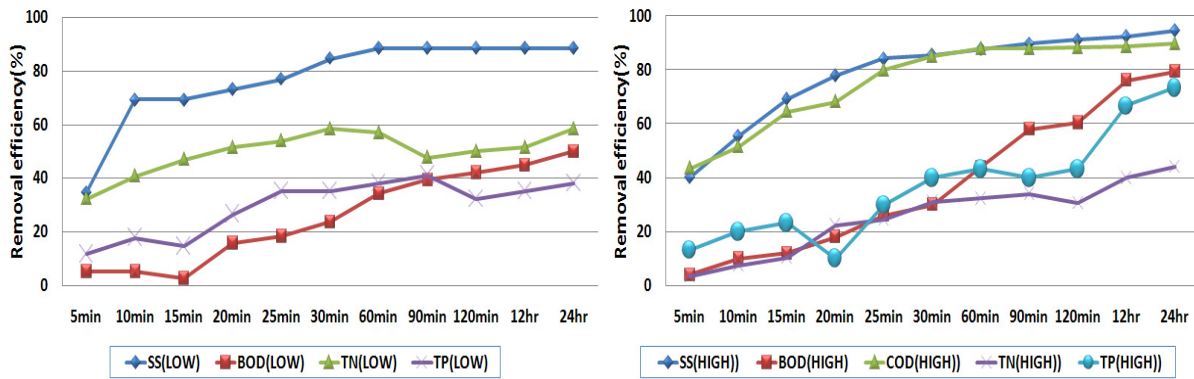


Fig. 5. Removal efficiency as a function of low and high concentration influent(infiltration velocity 50mm/hr)

Table 5. Removal efficiency as a function of elapsed time at infiltration velocity 50mm/hr

unit:%

	5min	10min	15min	20min	25min	30min	60min	90min	120min	12hr	24hr
SS(LOW)	34.6	69.2	69.2	73.1	76.9	84.6	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5
BOD(LOW)	5.3	5.3	2.6	15.8	18.4	23.7	34.2	39.5	42.1	44.7	57.1
TN(LOW)	32.3	40.8	46.9	51.5	53.8	58.5	56.9	47.7	50.0	51.5	58.5
TP(LOW)	11.8	17.6	14.7	26.5	35.3	35.3	38.2	41.2	32.4	35.3	38.2
SS(HIGH)	40.0	55.2	69.0	77.9	84.1	85.5	87.6	89.7	91.0	92.4	94.5
BOD(HIGH)	4.0	10.0	12.0	18.0	26.0	30.0	44.0	58.0	60.4	76.2	82.3
COD(HIGH)	43.5	51.4	64.5	68.2	80.0	85.0	87.8	88.0	88.2	88.7	89.8
TN(HIGH)	3.5	7.6	10.6	22.4	24.7	31.2	32.4	34.1	30.6	40.0	44.1
TP(HIGH)	13.3	20.0	23.3	10.0	30.0	40.0	43.3	40.0	43.3	54.8	59.3

13.3~59.3%의 처리효율을 보였다(Fig. 5, Table 5). 침투 속도 70mm/hr의 처리효율은 저농도에서 SS 13.3~76.7%, BOD 5.7~51.3%, TN 30.8~55.4%, TP 17.6~35.4%로

나타났고 고농도에서 처리효율은 SS 48.0~92.6%, COD 49.0~86.1%, BOD 6.0~79.4%, TN 1.2~38.8%, TP 6.7~52.8%를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 6, Table 6).

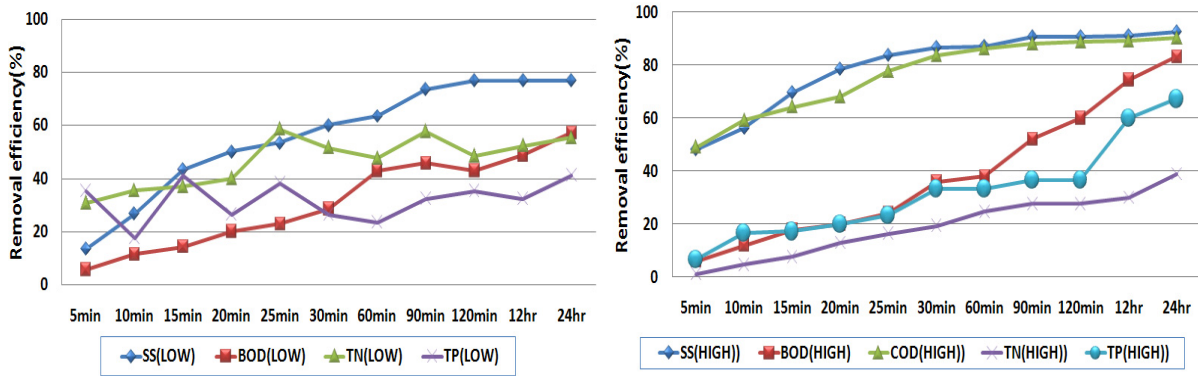


Fig. 6. Removal efficiency as a function of low and high concentration influent(infiltration velocity 70mm/hr)

Table 6. Removal efficiency as a function of elapsed time at infiltration velocity 70mm/hr

unit:%

	5min	10min	15min	20min	25min	30min	60min	90min	120min	12hr	24hr
SS(LOW)	13.3	26.7	43.3	50.0	53.3	60.0	63.3	73.3	76.7	76.7	76.7
BOD(LOW)	5.7	11.4	14.3	20.0	22.9	28.6	42.9	45.7	42.9	48.6	51.3
TN(LOW)	30.8	35.4	36.9	40.0	58.5	51.5	47.7	57.7	48.5	52.3	55.4
TP(LOW)	35.3	17.6	41.2	26.5	38.2	26.5	23.5	32.4	35.3	32.4	35.4
SS(HIGH)	48.0	56.1	69.6	78.4	83.8	86.5	87.2	90.5	90.5	91.2	92.6
BOD(HIGH)	6.0	12.0	18.0	20.0	24.0	36.0	38.0	52.0	60.0	74.4	79.4
COD(HIGH)	49.0	59.2	64.1	68.0	77.6	75.0	81.0	84.5	86.7	86.8	86.1
TN(HIGH)	1.2	4.7	7.6	12.9	16.5	19.4	24.7	27.6	27.6	30.0	38.8
TP(HIGH)	6.7	16.7	17.3	20.0	23.3	33.3	33.3	36.7	36.7	45.4	52.8

5. 결론

본 연구에서 미생물이 식종된 다공성 경량골재 및 순환골재를 침투식 비점오염저감시설에 충전하여 수질정화효율을 검토하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 다공성 경량골재 및 순환골재를 미생물에 식종하지 않은 상태에서도 COD 56.2%, BOD 35.0%, TN 32.0%, TP 52.4%의 처리효율이 있는 것으로 나타났으며, 이는 다공성 경량골재 및 순환골재의 흡착반응이 작용한 것으로 판단된다.

(2) 다공성 경량골재 및 순환골재에 *Bacillus subtilis*를 식종하여 여재로 사용한 결과 침투속도 30mm/hr에서 고농도

의 원수 유입시 SS 40.0~93.7%, COD 53.5~91.1%, BOD 10.0~91.0%, TN 2.6~65.8%, TP 16.3~69.7%의 처리효율이 있는 것으로 나타났다. 50mm/hr에서 처리효율은 SS 40~94.5%, COD 43.5~89.8%, BOD 4.0~82.3%, TN 3.5~44.1%, TP 13.3~59.3%이었고 침투속도 70 mm/hr의 경우 SS 48.0~92.6%, COD 49.0~86.1%, BOD 6.0~79.4%, TN 1.2~38.8%, TP 6.7~52.8%로 나타났다.

(3) 저농도와 고농도 유입수 비교 시험 결과 고농도에서 처리효율이 높은 것으로 나타났으며, 저농도 영역에서도 일정수준 처리효율이 있는 것으로 나타났기 때문에 강우시 저농도에서 고농도의 용존성 영양물질이 유입되더라도 안정적인 처리효율을 보장할 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 기존의 침투식 저감시설에 적용되었던 모래, 자갈

등은 용존성 오염물질을 제거할 수 없을 뿐 아니라, 지하수의 2차 오염을 유발할 수 있는 문제점이 있는 반면 본 연구에서 적용한 다공성 경량골재와 순환골재에 미생물을 식중하여 적용한 결과 여재를 거친 후 전항목의 침투수 농도가 평균 60%이상 제거되는 것으로 나타났다. 또한 처리수가 토양내로 침투되면서 토양에 의한 추가적인 저감이 가능할 것으로 판단된다.

(5) 추후 대상지역의 토양별 세부 메커니즘 및 처리효율과 상부에 식생여과대를 조성하여 처리효율을 향상 시키는 방안에 대하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 김석구(2004), 여재에 따른 노면유출수의 처리특성, *대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집*, vol 2004, pp. 407-410.
2. 최지용, 신창민(2002), 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안, 한국환경정책평가연구원.
3. 환경부(2008), 비점오염저감시설의 설치 및 관리운영 매뉴얼.
4. 환경부(2007), 수질오염공정시험법.