

도로상의 비점오염물질 저감을 위한 초기 우수유출수 처리에 관한 연구

노성덕 · 이대근 · 전양근[†]

환경시설관리공사

A Study on the Early-stage Storm Runoff Treatment for the Reduction of Non-point Pollution Materials on the Road

Sung-Duk Roh · Dae-Keun Lee · Yang-Kun Chun[†]

Environmental Facilities Management Corporation

(Received 25 August 2004, Accepted 6 September 2004)

Abstract : The object of this study was to test for STORMSYS process that composed Catch Basin and Stormsys(three units: vortex solids separator, filter media bed and vegetated filter strips). It could be applied to treat the first-flush non-point pollution materials on the road(especially, motorway). This study investigated that the runoff characteristics of non-point pollutions containing the heavy metal(Fe, Zn and Cu) by rainfall showed relatively high pollution concentration in the early-stage storm runoff on the road, which seems to be caused by the vehicular traffic, and showed the rapid reduction of pollution concentration on the basis of about 5mm rainfall volume. As the number of the non-rainy days were increased, the pollution concentration by storm runoff was increased, also. As a test result of this process, the average removal efficiency of BOD, COD_{mn}, SS, T-N and T-P over the testing period were 92.7%, 88.6%, 97.4%, 93.0% and 93.3%, respectively. Also, the average removal efficiency of n-Hexane, Fe, Zn and Cu were 86.7%, 96.1%, 84.4% and 78.4%, respectively. As shown in the characteristics of storm runoff, the non-point pollution materials have high pollution concentration in the early-stage storm runoff on the road, the installation of STORMSYS process is expected to reduce considerable amount of non-point pollutions.

keywords : Catch Basin, Non-point pollution materials, Storm runoff, STORMSYS process

1. 서론

우리나라의 수처리 기술개발은 생활하수나 공장폐수 등의 점오염원을 중심으로 진행되어 왔으나 환경부(2000)의 연구용역 결과에 의하면, 팔당상수원 유역 전체 오염량 중 비점오염원의 기여율이 발생량 기준으로 19.6%, 배출량 기준으로 44.5%에 달하는 것으로 조사되었다. 비점오염물질 중에서도 초기 우수유출수가 대부분의 오염물질을 포함하고 있기 때문에 초기우수에 의한 비점오염물질을 사전처리하는 문제는 지금 우리앞에 당면한 시급한 현안이라 할 수 있다. 실제로 공업지역의 초기 우수유출수의 농도가 폐수배출시설 배출허용기준의 최고 10배까지 조사되었고, 초기우수시 도로를 통한 오염물질 부하량 조사에서는 초기우수 2mm이내에서 COD 농도가 800ppm까지 나타내고 있으며, 도로지역이 도로의 지역보다 입자상물질은 20~80배, Cu, Pb등 중금속 물질은 3~10배나 높은 농도로 유출되고 있어 비점오염물질의 기여율이 매우 심각한 수준까지 이르렀음을 알 수 있다(경기도보건환경연구원, 2001).

현재 대부분의 도로는 불투수층 재질로 되어 있어 자동차운행과정과 도로 자체에서 비점오염형태로 발생하는 각

종 오염물질은 강우시 여과없이 급속하게 수계로 유입되고 있으며, 특히 여름철 강우시 온도가 높은 유출수가 수계로 직접 유입되어 수중의 용존산소를 급격하게 낮추게 되어 물고기 집단 폐사의 원인을 제공하고 있는 실정이다. 또한 도로의 유출수가 경작지로 직접 유입되는 경우에는 농작물의 생육에도 지장을 줄 수 있다. 특히 상수원을 가로지르는 교량과 강변도로는 특히 수계에 직접적인 영향을 미치므로 충분한 검토가 필요하다.

따라서 이러한 도로상의 초기 우수유출수에 의한 비점오염물질의 문제점을 해결하기 위하여 강우시 초기세척효과(first-flushing effect)에 의해 발생한 도로상의 고농도 비점오염물질을 사전처리할 수 있는 장치형 시설로 Catch Basin과 여과메디아 및 식생대를 이용한 STORMSYS[®]를 차세대 핵심환경기술개발사업(연구기간: 2001.8.1~2003.5.31)을 통해 국내 자체기술로 개발하게 되었으며, 현재 환경신기술 제64호로 지정된 본 시설의 적용을 통해 우리나라 도로상의 비점오염 관리와 수자원의 오염방지에 기여하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이

[†] To whom correspondence should be addressed.
chunsky@hanmail.net

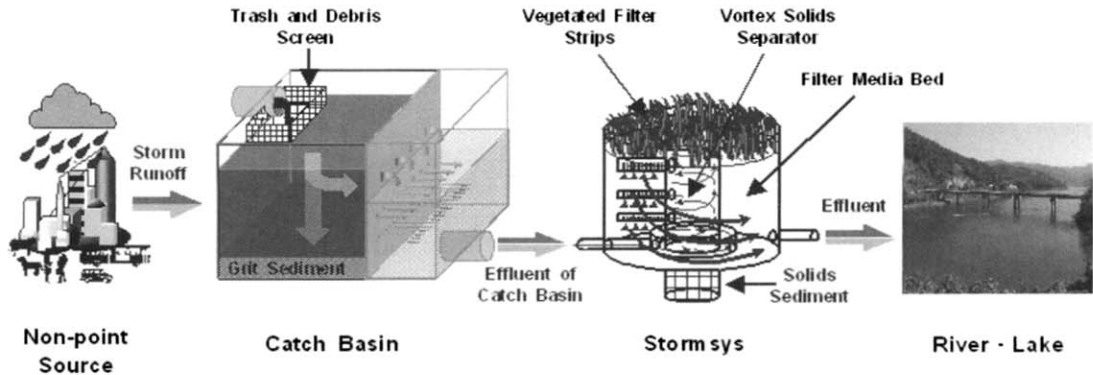


Fig. 1. Schematic diagram of STORMSYS process.

경부고속도로 하행선 대전광역시 인근 S교에 설치한 도로상의 비점오염물질을 처리할 수 있는 STORMSYS 공정을 이용하였다. 이 시설의 처리용량은 38.44m³/day로 고농도의 비점오염물질을 함유하는 도로상의 초기우수를 배수면적(drainage area) 2acre에서 유출되는 5mm 만큼을 저류할 수 있게 설계된 Catch Basin(규격: 4mW×4.9mL×2.2mH)과 고형물 분리장치(vortex solids separator), 여과메디아층(filter media bed) 및 식생대(vegetated filter strips)로 구성된 Stormsys(규격: Ø2.8m×1.8mH)로 구성하였다.

2.2. 운전방법

Catch Basin에서는 우수유출수 유입부에 쓰레기 및 잔사물 제거망(trash and debris screen)을 설치하여 직경 5cm 이상의 쓰레기 및 잔사물을 1차적으로 제거하게 되며, Catch Basin 내부에 부벽은 바닥에서 50cm 상부지점으로부터 직경 3cm의 구멍이 30cm 간격으로 뚫어져 있어 우수유출수와 함께 유입된 토사등의 침전물을 2차적으로 제거하게 된다. Catch Basin은 본 대상지점의 배수면적에서 유출되는 초기우수(5mm이하)를 전량 저류할 수 있는 용량으로 설계하였다. 또한 bypass관을 두어 초기우수 이후의 우수유출수는 본 시설내로 유입이 되지 않게 하였다.

Catch Basin으로부터 유입되는 우수유출수는 Stormsys 내

부로 유입되어 고형물 분리장치의 vortex와 screening 원리에 의해 고형물이 아래로 분리되어 제거된다. 고형물을 수거하기 쉽게 하기 위하여 상부지름 6mm, 하부지름 2mm로 타공된 고형물 분리망(solids separation screen)을 내부에 설치하였다. 고형물 분리장치를 거친 우수유출수는 Stormsys 내부의 분배관을 통해 경제적이고 오염물질 제거효율이 좋은 것으로 보고(Dixon et al., 1977; 和田光史, 1984; 한국과학기술연구원, 1995)된 질석(vermiculite), 경량기포콘크리트(lightweight foamed concrete)를 배합한 여과메디아층을 거쳐 최종 방류관을 통해 방류된다. 분배관 및 최종 방류관 주위에는 지름 5mm이상의 잔자갈을 채워 막힘현상을 줄이고 메디아의 유실을 방지하였으며, 여과메디아층 상부에는 식생을 식재하기 위하여 모래와 흙을 채웠다. 여과메디아층 상부에는 갈대(reeds, *phragmites communis*), 애기부들(*cattails, typha angustifolia*)등 정화능력이 탁월한 식생대를 조성(농림부, 1998; 이, 1999)하여 이들 식물의 근계로부터 우수와 메디아 공극사이에 고착되는 유기물과 영양염류의 생물학적 제거 및 메디아 투수성을 확보할 수 있게 하였다.

도로상의 비점오염물질을 처리할 수 있는 STORMSYS 공정은 전과정이 자연 유하식 흐름으로 설계된 무인, 무동력 시스템으로, 여과메디아 투수시험(permeability test)을 통해 도출한 설계조건을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Design condition of STORMSYS process

Parameter	Design standards
Drainage area	2 acre
Runoff coefficient(asphalt pavement)	0.95
Rainfall	5 mm
Early-stage storm runoff volume	38.44 m ³
Hydraulic load of media bed	2.12 ℓ/m ² ·min, 0.212 m ³ /m ³ ·hr
Permeability coefficient of media bed	2.4×10 ⁻³ cm/sec
Porosity of media bed	39.4 %
Working volume of stormsys	4.64 m ³
HRT of stormsys	2.9 hr

2.3. 실험 및 분석방법

본 연구는 2002년 6월 10일부터 2003년 5월 24일 사이 강우일중 총 25회 걸쳐 S교에서 채취된 초기우수 5mm이하의 우수유출수를 원수로 하여 STORMSYS 공정의 처리 성능을 분석하였다. Catch Basin과 관련해 유입단계에서 제거된 쓰레기 및 잔사물의 종류 및 건조중량(dry weight, g)을 분석하였고, 최초 우수유출수를 대상으로 Catch Basin 전·후의 BOD, COD_{mn}, SS 항목을 분석하여 제거효율을 조사하였다. Stormsys와 관련해 고형물 분리장치의 고형물 제거효율을 파악하기 위해서 유입·방류수 및 침전물내 고형물을 대상으로 체분석(sieve analysis)에 의한 입도분석 및 건조중량을 분석하였다. 여과매다의 적정 배합비를 산출하기 위하여 지름 10cm, 길이 100cm 원통 column에 질석과 경량기포콘크리트의 배합비를 달리하여 각각 60cm를 채우고 S교에서 채취된 우수유출수로 투수시험 및 제거효율을 분석하였다. 또한 식생대의 효과를 조사하기 위하여 질석과 모래로 채워진 같은 형태의 원통 column에 애기부들과 갈대를 각각 식재하고 다른 column 하나는 식재를 하지 않고 2개월동안 같은 농도(COD_{mn} 110mg/L)의 유입수를 주입하여 clogging을 인위적으로 유도한 후 수돗물(tap water)을 통과시켜 투수계수(permeability coefficient)를 산출하였다.

STORMSYS 공정의 유기물 및 영양염류제거와 관련해 BOD, COD_{mn}, SS, T-N, T-P의 항목에 대해 분석하였고, 석유화합물질 및 중금속 제거효율을 파악하기 위하여 n-Hexane, Fe, Zn, Cu에 대한 분석도 함께 수행하였다. 초기우수(5mm 이하)를 포함하여 우수유출수 농도가 저농도로 나타나는 시점까지 강우강도(rainfall intensity)에 따라 2min~1hr 간격으로 시료를 채취하였다. 채취된 시료는 Standard Methods(APHA 20th, 1998) 및 수질오염 공정시험법(환경부, 1999)에 따라 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 우수유출수 특성분석

경부고속도로 하행선 대전광역시 인근 S교의 강우량대별 우수유출수의 농도변화를 살펴보면, Fig. 2에 나타난 바와 같이 강우량에 따라 급격한 오염물질 감소가 나타났는데, 강우가 시작된 시점에서 강우량 약 5mm 정도를 기준으로 SS를 비롯한 BOD 및 COD_{mn}의 오염물질 농도가 급격하게 감소되는 경향을 보였다. 이와 같이 초기세척 현상이 발생하는 이유는 도로가 아스팔트로 구성된 불투수성 지역이기 때문이다(방 등, 1997; Delleur, 1982; Novotny et al., 1981). 따라서 본 도로상의 초기 우수유출수에 따른 비점오

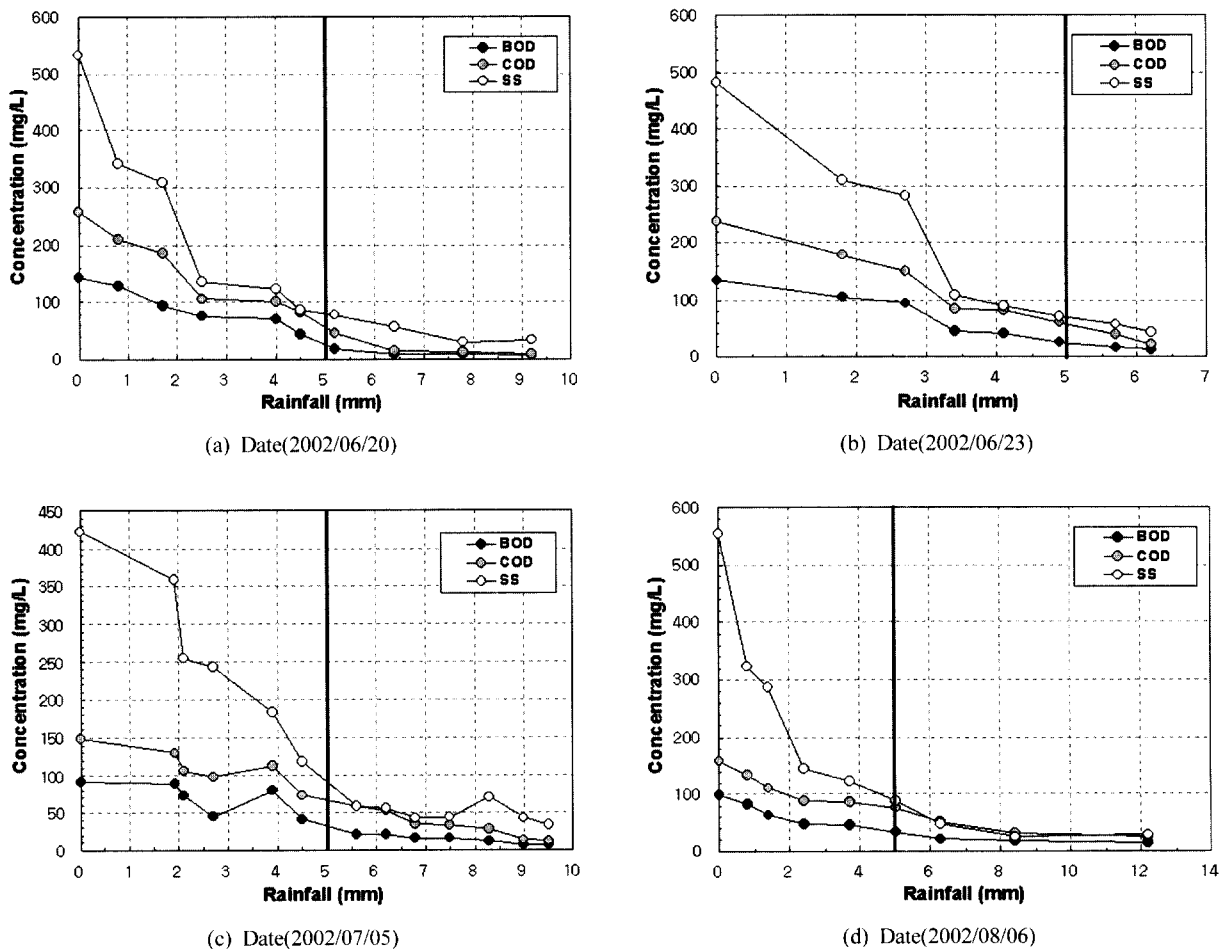


Fig. 2. Variation of BOD, COD_{mn} and SS concentration with rainfall.

염물질 저감을 위한 STORMSYS 공정 설계시 Catch Basin 설계인자로서 배수면적을 고려하여 초기우수 5mm만큼을 저류할 있도록 설계하였다.

우수유출수의 또다른 특징으로 안 (2000)과 Wanielista 등(1997)의 연구결과에서와 마찬가지로 우수유출수의 함유 정도는 Fig. 3과 Table 2에 나타난 바와 같이, 무강우일수와도 상당한 관련이 있음을 알 수 있었다. 무강우일수가 18일이었던 2002년 6월 10일의 초기강우 5mm 평균 COD_{mn}가 125.4mg/L로 무강우일수가 2일이었던 2002년 7월 22일의 68.8mg/L 보다 약 1.6배가량 높은 농도가 나타났으며, SS와 T-N의 경우에도 약 1.2배가량 높은 농도를 보였다.

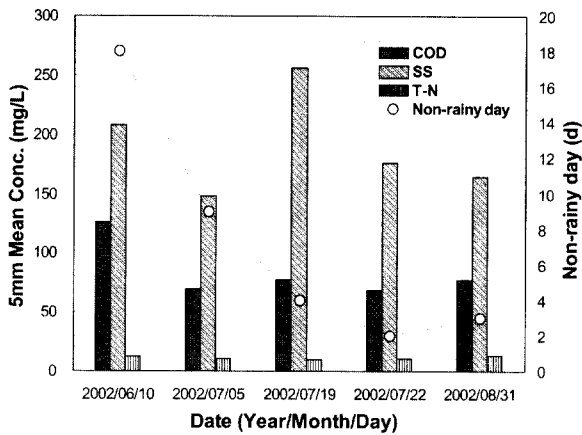


Fig. 3. Comparison of mean COD_{mn}, SS and T-N concentration during the early rainfall 5mm according to the non-rainy day.

Table 2. COD_{mn}, SS and T-N concentration during the early rainfall 5mm according to the non-rainy day

Date (Y/M/D)	COD _{mn} (mg/L)		SS(mg/L)		T-N(mg/L)		Non-rainy day(d)
	Max.	Avg.	Max.	Avg.	Max.	Avg.	
2002/06/10	257.4	125.4	532.8	207.9	24.700	12.095	18
2002/07/05	148.7	69.4	421.8	148.1	21.589	10.706	9
2002/07/19	131.2	77.1	402.1	256.1	17.326	9.818	4
2002/07/22	190.8	68.8	399.0	175.7	26.558	10.234	2
2002/08/31	111.4	77.7	554.0	164.4	58.678	12.879	3

Table 3. Composition of removal trash and debris in Catch Basin

Item	Test #1		Test #2		Test #3		Test Avg.	
	dwt(g)*	ratio(%)	dwt(g)	ratio(%)	dwt(g)	ratio(%)	dwt(g)	ratio(%)
Paper	3.2	1.1	4.5	1.4	5.2	2.7	4.3	1.6
Styrofoam, Vinyl	5.4	1.8	2.4	0.8	15.4	7.9	7.7	2.9
Plastic	3.2	1.1	3.5	1.1	4.1	2.1	3.6	1.3
Can, Metal	29.7	10.0	27.4	8.7	15.7	8.1	24.3	9.0
Grass, Wood	255.4	86.0	278.5	88.0	153.8	79.2	229.2	85.2
Total	296.9	100.0	316.3	100.0	194.2	100.0	269.1	100.0

* dwt(g) : dry weight(g)

3.2. Catch Basin의 처리성능

3.2.1. 쓰레기 및 잔사물 제거량

Catch Basin은 강우시 배수면적, 초기우수 및 유출계수를 고려하여 고농도의 오염물질을 함유한 초기 우수유출수를 설계용량 만큼 저류시켜 Stormsys 내부로 유입되는 우수유출수량을 조절함과 동시에, 그 이후의 강우는 오염물질의 농도가 저농도이므로 bypass시키는 기능이 있다. 또한 저류시킨 초기우수에 포함된 토사와 잔사물등의 고형물을 침전 및 분리시키는 역할을 수행한다. Table 3은 Catch Basin에 의해 제거된 쓰레기 및 잔사물의 종류별 건조중량을 총 3회 분석한 것으로, 제거된 쓰레기 및 잔사물의 건조중량은 평균 269.1g으로 조사되었다. 대부분이 나뭇가지, 나뭇잎 및 풀 종류로 건조중량기준 약 85%를 보였으며, 기타로는 종이류, 비닐류, 플라스틱류 및 스트로폼 등이 제거되었다.

3.2.2. Catch Basin의 제거효율

Fig. 4는 운전기간동안 최초 우수유출수를 대상으로 한 Catch Basin의 BOD, COD_{mn}, SS 제거효율 변화를 나타낸 것으로, 우수유출이 발생하여 Catch Basin내로 유입되는 최초 우수유출수의 BOD, COD_{mn}, SS 농도는 각각 48.6~153.4(평균 95.7)mg/L, 64.2~257.4(평균 147.5)mg/L, 132.5~760.0(평균 418.9)mg/L, Catch Basin을 통과한 우수유출수 농도는 각각 38.2~142.7(평균 67.6)mg/L, 52.1~200.2(평균 101.2)mg/L, 74.3~312.5(평균 176.1)mg/L로 조사되었으며, 제거효율은 각각 평균 28.7%, 31.1%, 58.4%를 보였다.

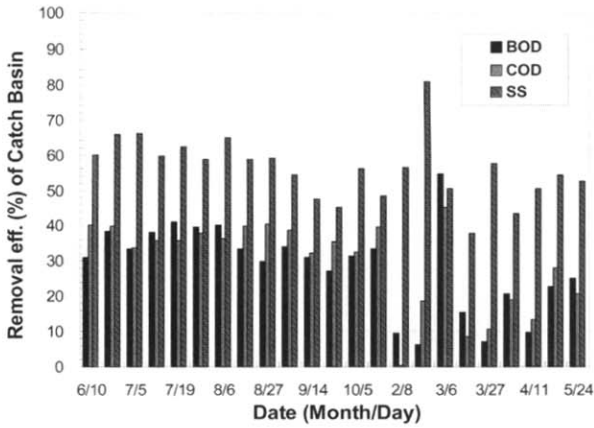


Fig. 4. Variation of BOD, COD_{mn} and SS removal efficiency in Catch Basin.

3.3. Stormsys의 처리성능

3.3.1. 고형물 분리장치

Table 4는 고형물 분리장치의 유입·방류수 및 침전물을 대상으로 총 3회 분석한 고형물의 입도 및 성분에 따른 건조중량비를 나타낸 것이다. Catch Basin에서 고형물 분리장치로 유입된 우수유출수와 방류수의 건조중량비를 비교했을 때, 입도 0.5~0.125mm 범위에서 각각 85.4%와 98.3%로 대부분을 구성하였으며, 방류수 경우 입도 1mm이하가 전체 99.7%를 보였다. 또한 고형물 분리장치에서 제거된 침

전물과 방류수의 입도분석결과 입도 1~7mm에서 고형물의 건조중량비가 각각 74.2%와 0.8%로, Catch Basin과 Stormsys의 수두차로 인해 고형물 분리장치내에서 발생하는 vortex와 screening에 의해 고형물이 효과적으로 제거됨을 알 수 있었다.

3.3.2. 여과메디아의 투수시험

여과메디아의 구성재료인 질석과 경량기포콘크리트의 적정배합비를 산출하기 위하여 투수시험을 수행한 결과 Table 5에 나타낸 바와 같이 산출된 투수계수 및 제거효율을 살펴보면, 질석과 경량기포콘크리트를 1.3 : 1, 1.5 : 1로 배합한 column에서의 투수계수가 각각 $2.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, $1.8 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 나타났으며, 평균 COD_{mn} 및 SS 제거효율이 비슷한 점을 감안할 때 배합비 1.3 : 1이 본 실험에서 여과메디아의 적정배합비라 판단된다.

3.3.3. 식생대의 효과

질석과 모래로 채워진 같은 형태의 column에 애기부들과 갈대를 각각 식재하고 다른 column 하나는 식재를 하지 않은 column에 대하여 수돗물을 통과시켜 투수계수를 산출한 결과, Table 6에 나타낸 바와 같이 애기부들의 경우 투수계수는 평균 $3.5 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, 갈대의 경우 투수계수는 평균 $3.3 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 식재하지 않은 경우의 평균 $2.8 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 에 비하여 비교적 높은 투수율을 나타내었다.

Table 4. Composition of influent, effluent and sediment in vortex solids separator

Item		Influent	Effluent	Sediment
Grain size(mm)	Solids type	dwt ratio(%) [*]	dwt ratio(%)	dwt ratio(%)
7.000	Gravel	2.9	0.0	8.3
5.000	Fine gravel	3.2	0.0	20.3
2.000	Very gross sand	3.2	0.3	29.0
1.000	Gross sand	4.2	0.5	16.6
0.500	Sand	11.3	10.5	11.9
0.250	Fine sand	48.0	59.4	7.8
0.125	Very fine sand	26.1	28.4	5.6
0.063	Gross silt	1.2	0.9	0.5
<0.063	Silt	0.0	0.0	0.0

* All of dwt(dry weight) ratios are mean values of three times experimental data.

Table 5. Comparison of the permeability coefficient and removal efficiency according to the mix ratio of the filter media

Mix ratio(by weight)	Permeate flow rate (mL)	Permeability coeff. (cm/sec)	Avg. removal eff.(%)	
			COD _{mn}	SS
Vermiculite : Concrete [*]				
1 : 1.2	2,000	1.2×10^{-2}	35.1	68.9
1.1 : 1	2,000	4.1×10^{-3}	42.7	87.5
1.3 : 1	2,000	2.4×10^{-3}	57.2	91.4
1.5 : 1	2,000	1.8×10^{-3}	57.8	92.1

* Concrete : Lightweight foamed concrete

Table 6. Comparison of the permeability coefficient with and without vegetation on top of the filter media bed(vermiculite & sand)

Item	Test #1	Test #2	Test #3	Test Avg.
	(cm/sec)	(cm/sec)	(cm/sec)	(cm/sec)
Permeate flow rate	500mL	500mL	500mL	500mL
Without vegetation	3.0×10^{-3}	2.6×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}
With vegetation(reeds)	3.2×10^{-3}	3.4×10^{-3}	3.1×10^{-3}	3.3×10^{-3}
With vegetation(cattails)	3.6×10^{-3}	3.5×10^{-3}	3.4×10^{-3}	3.5×10^{-3}

따라서 식재하지 않은 column에 비하여 애기부들을 식재한 미디어 column이 1.25배, 갈대를 식재한 미디어 column이 1.18배 가량 높은 투수계수를 보여, 식물의 근계가 오염물질 제거와 더불어 Stormsys내 여과메디아층 clogging 현상의 방지 및 미디어 수명연장에 효과가 있을 것으로 판단된다.

3.3.4. 항목별 오염물질 제거효율

본 연구는 STORMSYS 공정의 오염물질 제거효율 분석시 Catch Basin과 Stormsys를 구분하지 않고 도로상의 우수유출수를 원수로 하여 Stormsys 방류수의 수질분석을 통하여 제거효율을 평가하였다. 상기 설명한 바와 같이 최초 우수유출수를 대상으로 Catch Basin 전·후의 수질분석을 통한 제거효율을 조사했을 뿐, Catch Basin에서 Stormsys로의 유입수질은 분석하지 않았다. 이는 본 시설이 지하구조물로 되어 있어 연속적인 시료 채취가 어려웠기 때문이다. 따라서 항목별 오염물질 실험결과는 Stormsys만의 오염물질 제거효율이 아니라 Catch Basin을 포함한 전체 STORMSYS 공정의 오염물질 제거효율이다.

Table 7에 2002년 6월 10일부터 2003년 5월 24일 사이 강우일중 총 25회 걸쳐 S교에서 채취된 초기우수 5mm이하의 우수유출수를 원수로 하여 STORMSYS 공정의 방류수 및 제거효율을 분석한 결과를 나타냈다.

STORMSYS 공정의 유기물 제거와 관련해 Fig. 5에 나타난 바와 같이 초기우수 5mm이하 우수유출수의 일평균 유

입 BOD, COD_{mn}, SS 농도는 각각 31.1~153.4(평균 74.2)mg/L, 41.5~184.0(평균 113.2)mg/L, 81.0~722.0(평균 303.6)mg/L, Stormsys를 통과한 일평균 방류수 농도는 각각 2.3~11.1(평균 5.4)mg/L, 7.0~16.5(평균 12.8)mg/L, 2.4~13.0(평균 7.8)mg/L를 나타내어, 제거효율은 각각 평균 92.7%, 88.6%, 97.4%를 보였다.

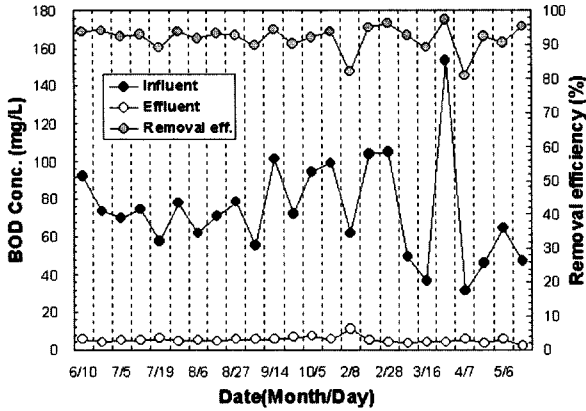
Fig. 6은 영양염류와 관련한 것으로, 초기우수 5mm이하 우수유출수의 일평균 유입 T-N, T-P 농도는 각각 5.28~62.41(평균 26.08)mg/L, 0.40~3.43(평균 1.29)mg/L, Stormsys를 통과한 일평균 방류수 농도는 각각 0.30~6.97(평균 1.82)mg/L, 0.01~0.17(평균 0.09)mg/L를 나타내어, 제거효율은 각각 평균 93.0%, 93.3%로 높게 나타났다.

석유화합물질 및 중금속과 관련해 Fig. 7에서와 같이 초기우수 5mm이하 우수유출수의 일평균 유입 n-Hexane, Fe, Zn, Cu 농도는 각각 13.5~54.8(평균 36.9)mg/L, 3.21~42.36(평균 13.76)mg/L, 0.32~2.72(평균 1.06)mg/L, 0.03~0.25(평균 0.16)mg/L, Stormsys를 통과한 일평균 방류수 농도는 각각 2.3~11.4(평균 4.9)mg/L, 0.06~1.83(평균 0.54)mg/L, 0.00~0.35(평균 0.16)mg/L, 0.00~0.10(평균 0.04)mg/L로 나타났으며, 제거효율은 각각 평균 86.7%, 96.1%, 84.4%, 78.4%를 보였다.

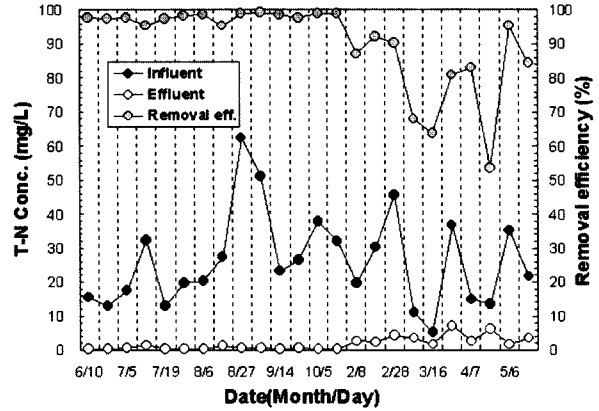
이와 같이 높은 제거효율의 실험결과는 Catch Basin 및 Stormsys내 고품물 분리장치 등의 전처리시설에 의한 고품물 제거와 여과메디아층의 여과·흡착능력, 미디어표면과 내부공극에 형성된 생물막에 존재하는 미생물에 의한 생물

Table 7. Operating result of STORMSYS process

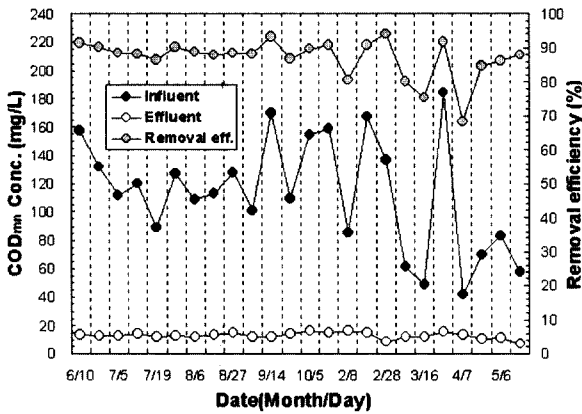
Item	Influent(mg/L)		Effluent(mg/L)		Removal eff.(%)
	Range	Avg.	Range	Avg.	Avg.
BOD	10.4~153.4	74.2	2.1~11.9	5.4	92.7
COD _{mn}	15.7~257.4	113.2	5.4~18.3	12.8	88.6
SS	24.9~805.3	303.6	2.0~14.6	7.8	97.4
T-N	2.56~69.31	26.08	0.24~8.39	1.82	93.0
T-P	0.08~7.54	1.29	0.01~1.71	0.09	93.3
n-Hexane	3.2~98.6	36.9	1.9~14.4	4.9	86.7
Fe	0.00~76.05	13.76	0.00~1.91	0.54	96.1
Zn	0.00~3.35	1.06	0.00~0.55	0.16	84.4
Cu	0.00~0.39	0.16	0.00~0.13	0.04	78.4



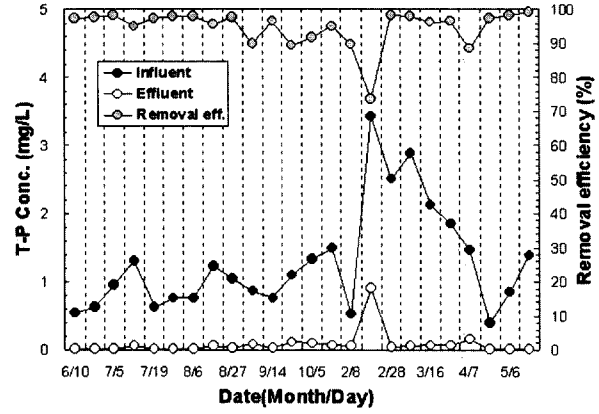
(a) BOD



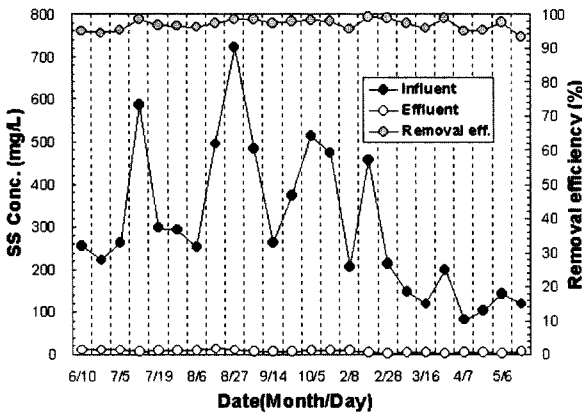
(a) T-N



(b) COD_{mn}



(b) T-P



(c) SS

Fig. 5. Variation of average daily BOD, COD_{mn}, SS concentration and removal efficiency in the rainfall volume under 5mm.

학적 분해에 기인한 것으로 판단된다. 또한 일부는 Stormsys 상부 식생대의 근계를 통한 오염물질 제거의 영향인 것으로 사료된다.

4. 결론

전과정이 자연 유하식 흐름으로 설계된 무인, 무동력 시

Fig. 6. Variation of average daily T-N, T-P concentration and removal efficiency in the rainfall volume under 5mm.

스템으로 도로상의 초기 우수유출수에 의한 고농도 비점오염물질을 사전처리할 수 있는 STORMSYS 공정의 실험결과와는 다음과 같다.

1. 경부고속도로 하행선 대전광역시 인근 S교의 강우량대별 우수유출수의 농도를 분석한 결과 강우량에 따라 급격한 오염물질 감소가 보여, 강우가 시작된 시점에서 강우량 약 5mm 정도를 기준으로 SS를 비롯한 BOD 및 COD_{mn}의 오염물질 농도가 급격하게 감소되는 경향을 보였다. 또한 무강우일수가 길수록 우수유출수가 고농도 유출됨을 확인할 수 있었다.
2. Catch Basin의 우수유출수 유입부에서 제거된 쓰레기 및 잔사물의 건조중량을 총 3회 분석한 결과 평균 269.1g으로 조사되었으며, 대부분이 나뭇가지, 나뭇잎 및 풀 종류로 건조중량기준 약 85%를 보였다. 운전기간동안 최초 우수유출수를 대상으로 한 Catch Basin의 BOD, COD_{mn}, SS 제거효율은 각각 평균 28.7%, 31.1%, 58.4%를 보였다.
3. Stormsys내 고�형물 분리장치에서 제거된 침전물과 방류수의 입도분석결과 입도 1~7mm에서 고�형물의 건조중량비가 각각 74.2%와 0.8%로 조사되어, Catch Basin과

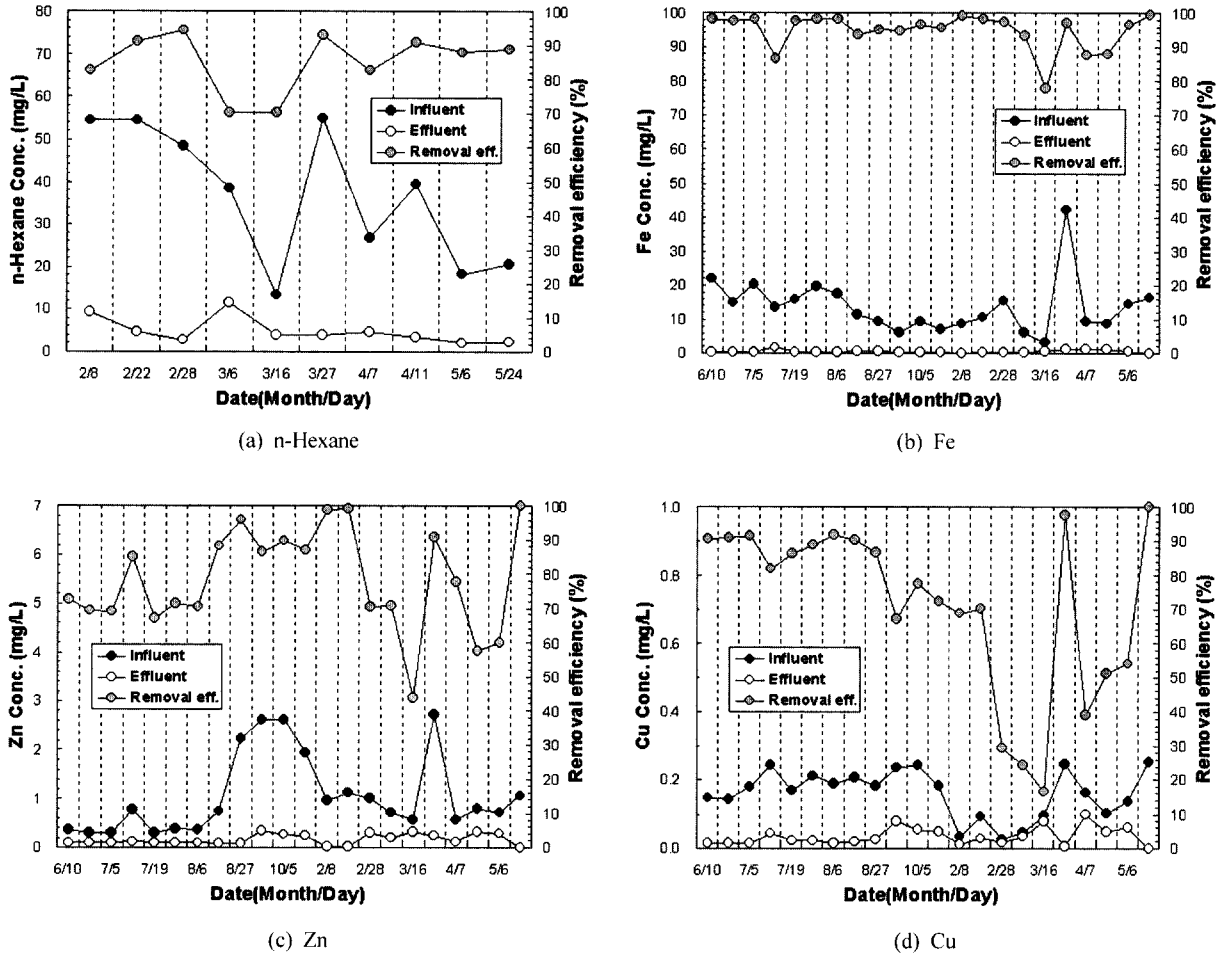


Fig. 7. Variation of average daily n-Hexane, Fe, Zn, Cu concentration and removal efficiency in the rainfall volume under 5mm.

Stormsys의 수두차로 인해 고품물 분리장치내에서 발생되는 vortex와 screening에 의해 고품물이 효과적으로 제거됨을 알 수 있었다.

- 여과매체의 투수시험결과 산출된 투수계수와 제거효율을 고려할 때 1.3 : 1의 배합비가 본 실험에서 질석과 경량기포콘크리트의 적정배합비라 판단된다. 또한 식생대의 효과를 파악하기 위하여 column test를 수행한 결과 식재하지 않은 column에 비하여 애기부들을 식재한 매디아 column이 1.25배, 갈대를 식재한 매디아 column이 1.18배 가량 높은 투수계수를 보여, 식물의 근계가 오염물질 제거와 더불어 Stormsys내 여과매디아층 clogging 현상의 방지 및 매디아 수명연장에 효과가 있을 것으로 판단된다.
- 운전기간동안 STORMSYS 공정의 BOD, COD_{mn}, SS, T-N, T-P 제거효율은 각각 평균 92.7%, 88.6%, 97.4%, 93.0%, 93.3%로 나타났으며, 석유화합물질 및 중금속과 관련해 n-Hexane, Fe, Zn, Cu 제거효율은 각각 평균 86.7%, 96.1%, 84.4%, 78.4%를 보여, 도로상의 비점오염물질 유출특성을 감안할 때, 본 시설을 적용함으로써 수자원의 오염을 방지하고 하천과 호소의 수질향상에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 차세대 핵심환경기술개발사업의 ‘초기강우에 따른 비점오염물질 사전처리 기술개발’ 과제(과제번호: 063-021-001) 연구성과의 일부 내용입니다. 연구개발비를 지원한 환경부에 감사드립니다.

참고문헌

경기도보건환경연구원, 비점오염원 관리방안 (2001).
 농림부, 농어촌진흥공사, 수생식물에 의한 수질개선기법 연구(II) (1998).
 방기웅 등, 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, *한국수질보존학회지*, 13(1), pp. 79-99 (1997).
 안재환, 비도시지역에서 강우사상에 따른 비점오염원 유출 특성 연구, *건설기술정보*, pp. 18-23 (2000).
 이우주, 수생식물의 수질정화 효과에 관한 연구, *한양대학교* (1999).
 한국과학기술연구원, 질석을 이용한 유기폐수 처리기술 개발 (1995).
 환경부, *수질오염 공정시험법* (1999).
 환경부, *팔당상수원 비점오염원 최적관리사업 타당성 조사*

- 및 기본계획수립 보고서 (2000).
- 和田光史, 토양의 흡착현상-기초와 응용, 일본토양과학회편, 博友社 (1984).
- APHA, AWWA and WEF, *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, Washington D.C., USA (1998).
- Delleur, J. W., *Urban Stormwater Hydrology*, ed. by David F. Kibler, American Geophysical Union, pp. 1-34 (1982).
- Dixon, J. B., and Weed, S. B., *Minerals in Soil Environments*, *Soil Sci. of American*, Madison, Wisconsin (1977).
- Novotny, V. and Chesters, G., *Handbook of Nonpoint Pollution; Sources and Management*, Van Nostrand Reinhold CO. N. Y., pp. 312-390 (1981).
- Wanielista, M. P., Yourself, Y. A., and McLellon, W. M., Nonpoint Source Effect on Water Quality, *Journal WPCF*, pp. 441-451 (1997).