



노면 유출수 재이용 시스템

1. 서론

공공수역으로 유입되는 오염물질의 발생원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있다. 점오염원은 주로 가정하수와 공장폐수로 구성되고, 일정한 지점에서 일정한 양이 지속적으로 발생하므로 강우시나 비강우시 배출량의 차이가 없다. 그러나 비점오염원은 오염물질이 주로 강우시 지표면 유출수와 함께 유출되는 오염물질로서 일간, 계절간 배출량 변화가 크고 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건·지질·지형 등에 영향을 받는 특성을 지니고 있다. 또한, 강우시 지표면의 비점오염원이 유출되는 강우 유출수는 중금속, 박테리아, 기름성분 및 질소나 인과 같은 부영양화 영양염류 등의 오염물질이 다량 함유되어 있을 뿐만 아니라, 생태계에 악영향을 주는 내분비계 장애물질 등 다양한 오염물질을 포함하고 있다. 유출오염부하는 하수처리장에 의한 것보다 매우 높은 것으로 보고 되고 있다 (Sarter et al., 1974).

지금까지 국내 환경기술은 공공수역의 수환경 보전을 위해 점오염원을 제어하는데 주력해 왔으나, 최근 들어 효율적인 공공수역의 수환경 보전을 위해서는 점오염원의 관리와 함께 비

점오염원에 대한 관리가 반드시 필요하다는 인식이 대두되고 있다. 비점오염원을 효과적으로 제어하면 수용하천의 수질을 개선할 수 있으며, 더 나아가 효과적인 물 사용과 연결될 수 있다. 우리나라는 현재 비점오염원 제어를 위한 관리 대책이 시행되고 있으며, 비점오염원 처리 장치의 적용 및 개발이 이루어지고 있다.

4대강 유역에서 비점오염원의 영향(BOD 기준)은 전체 오염부하의 22~37% 이상으로 예측되고 있으며 (정부합동, 1999~2000), 팔당상수원의 경우, 전체 BOD 오염부하의 45%가 비점오염원에서 배출되고, 2020년에는 54%까지 증가할 것으로 예측되고 있다 (환경부, 2000). 비점오염물질은 산지나 논·밭에 비해 도시·공업지역에서 유출량이 높으며, 대부분 강우 유출수와 함께 수계로 유입 된다. 토지이용별 비점오염물질 수계 전체 배출량은 도시(대지)가 52%로 가장 많으며, 산림 17%, 농경지 11% 순으로 발생하고 있다 (정부합동, 1999~2000).

도시 유출수는 비점오염원 중 큰 비중을 차지하며, 도시화의 진행에 따른 비점오염원의 부하량도 매년 증가하고 있다 (Peter et al., 2000; 최, 1997). 또한, 도시는 불투수성 면적 비율이 다른 토지 이용지역에 비해 높음으로 강우 초기에 오염물질이 다량 유출되는 초기 유출 현상이 두드러진다 (Michael et al., 1998; Torben et al., 1998; John et al., 1997). 특히 도시 내 도로노면유출수의 경우, 차량 등의 이동으로 오염물질의 농도가 높은 것으로 알려져 있어 (Rebecca et al., 2002; Robert et al., 1995), 초기 유출 부하량이 수계 및 하수처리시설에 미치는 영향은 큰 것으로 판단된다.

비점오염원으로서의 노면 유출수는 일정하게 배출되는 하수 및 폐

수와는 달리 지역특성, 강우강도, 생기빈도에 큰 영향을 받으며, 특히 초기세척효과로 강우초기에 고농도의 유출수가 발생하고 강우가 지속됨에 따라 오염물의 농도는 점차 줄어들어 아주 낮거나 검출한계 이하가 된다. 따라서 노면 유출수를 처리하기 위해서는 대용량의 처리장치보다는 고농도의 오염물을 함유한 초기우수만을 선택적으로 처리할 수 있는 소형 처리장치의 개발 및 실용화가 필요하다.

노면 유출수 내 오염물질 처리는 전체 강우 동안의 유출수를 처리하는 방법보다 초기 강우에 의한 노면 유출수를 처리하는 것이 하수처리시설의 부담을 줄임과 동시에 경제적으로 효과적인 처리방법이라 생각된다. 더욱이 노면 유출수의 처리에 그치는 것이 아니라 처리한 노면 유출수를 수자원으로 재이용할 수 있는 방안도 고려할 필요가 있다. 따라서 본 고에서는 노면 유출수 재이용 시스템의 현장 적용을 위해 노면 유출수의 유출 특성과 노면 유출수 재이용 시스템의 배수 및 처리특성에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 노면 유출수의 유출 특성

2.1 연구방법

강우강도에 따른 오염물질의 유출특성을 살펴보기 전에 실제 노면 유출수의 수질특성을 관찰하였다. 2003년 8월 ~ 2004년 3월 중 내린 10회의 강우에 대하여 한국건설기술연구원 앞

국가지원지방국도 98도로에서 강우를 채수하였다. 강우 초기 오염물질의 유출량을 파악하기 위하여 강우초기 1시간 동안의 빗물을 채수하여 노면 유출수의 수질특성을 분석하였다.

또한, 오염물질의 유출특성에 강우강도가 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실험실에서 각 강우강도의 강우를 모사하여 실험하였다. 실제 노면배수의 유출 상황과 유사하게 조정하기 위하여 30 30cm의 아스팔트 모형도로를 제작하였다.

Fig. 1은 실험에 사용한 모형도로의 오염된 모습(a)과 실험 진행모습(b)이다. 강우강도는 모형도로에 유입되는 강우강도별 유입량을 계산하여 재현하였으며, 실험 종료 후 총 유출수의 부피를 이용하여 실험으로 진행된 강우강도를 최종적으로 확정하였다. 인공강우는 압력 분무기를 이용하여 분무 시간을 조절함으로써 실제와 유사한 강우를 모사하고자 하였다. 모형도로의 오염은 실제 도로노면유출수를 이용하였고, 모형 도로를 오염시킨 후 완전히 습기가 마르기 전에 실험을 시작하여 도로노면에서 유출이 시작되는 시점과 같도록 하였다. 실험에서 모사된 강우강도는 3.7, 5.9, 8.8, 11.8mm/hr이다.

각 강우에 대한 노면유출수의수질 특성을 분석하기 위하여 SS, 중금속을 분석하였고, pH, Conductivity, Turbidity를 측정하였다. 강우강도에 따른 오염물질의 유출현상을 살펴보기 위하여 SS를 분석하였다. pH와 Conductivity는 pH/conductivity meter (Orion model 550A), Turbidity는 Turbidity meter (HACH 2100N)을 이용하여 측정하였고, SS는 유리 섬유 여지법, 중금속은 AAS (PerkinElmer AAnalyst 100)으로 분석하였다(APHA et al., 1998).

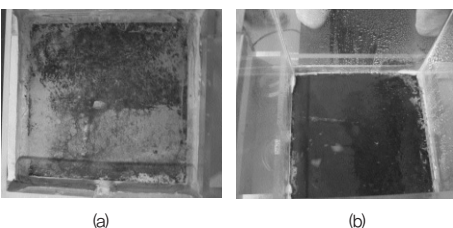
2.2 결과 및 고찰

2.2.1 강우 특성 및 노면유출수의 유출 특성

2003년 8월 ~ 2004년 3월에 내린 10회의 강우특성을 Table 1에 나타내었다. 강우량 3 ~ 143mm, 강우지속시간 2 ~ 22hr, 최고 강우강도 2 ~ 22mm/hr, 이전 건기일 1 ~ 34일 등 다양한 형태의 강우를 확인할 수 있다.

Table 2는 채수한 각 강우에서 일반적인 수질 특성 값을 나타내었다. 노면은 불투수성 면적비율이 높아 강우에 대한 유출 및 유량과 수질 농도의 변화가 빠르게 나타난다. 특히 오염물질이 강우초기에 일시에 배출되는 초기유출 현상이 두드러져, 우수피크유출에 앞서 최대 오염유출이 발생하여 하천에 큰 영향을 미치는 경향이 나타난다(최, 2002). 일반적으로 초기 강우는 산성으로 알려져 있으나 시멘트 면이나 도로 노면 등을 거친 강우는 산성이 약해지는 것으로 보고된 연구가 있다(최 등 2003).

Fig. 1. Road model(30 30cm); polluted before experiment (a), experiment was being processed (b).



본 실험에서도 pH는 7.2 ~ 8.8로 나타났다. 전 기전도도는 0.5mS/cm로 나타났으며 탁도는 50 512NTU 나타났다. SS는 145~650mg/L로 나타났다. SS는 강우강도의 영향을 크게 받으나 이전 건기일수에 따른 노면의 높은 오염물 축적도에 의하여 한 번에 유출되는 현상이 큰 것으로 나타나고 있다.

중금속의 유출 특성은 오염원의 발생원에 따라 달라진다. 크게 3가지의 형으로 분류할 수 있다. Zn 오염형은 자동차 타이어의 마모에 의한 오염형이며, Cu, Cr, Pb 오염형은 자동차의 배기 가스 및 브레이크의 마모 현상에 기인된다고 보고 되고 있다. As, Cd 오염형은 오염정도가 대체로 미약하고 일부지역에서만 높게 나타나는 오염형으로 오염원이 판단하기 어려운 것으로 보고 되고 있다(이, 2001).

다른 중금속 보다 Zn의 오염도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이는 노면 유출수의 중금속의 주요원인 인자로 타이어 마모로 인한 퇴적물이 도로노면의 주요 오염원으로 생각된다. PAHs는 발암성과 돌연변이성을 가진 위해성 물질로 극소량으로도 암을 유발할 수 있다. 미국 EPA에서는 PAHs 16가지 물질을 기준물질로 선정하여 관리하고 있다. 이들 16가지 물질 중 11개 물질이 일본, 유럽 및 미국 등에서 내분비계 장애 물질로 선정되어 있는 것으로 노면 유출수내에 이러한 물질이 포함될 경우 위해를 가할 수 있는 위험성 물질이다.

실험 결과 수집환경 내에서 PAHs는 SS에 흡착한 상태로 존재하고 저분자량보다 고분자량의 PAHs 쪽이 고체상으로서의 분배가 많아지는 것을 알 수 있었다. 즉 도로배수 중의 PAHs는 도로 배수와 함께 유출되는 SS의 농도와 관련이 있으며, 그 중 벤젠고리가 많은 PAHs의 농도가 높은 것으로 나타났다.

Fig. 2는 실제 유출되는 SS와 중금속의 유

Table 1. General conditions of collected rainfall

Items	Date										
	'03 8/19	9/5	9/9	9/15	10/1	10/19	10/21	11/7	11/12	'04 2/21	
Total rainfall (mm)	143	24	56	-	3	-	5	19	5	56	
Rainfall duration (hr)	22	4	14	-	2	-	2	14	2	4	
Maximum rain intensity (mm/hr)	22	16	21	-	2	-	3	4	3	21	
Previous dry-weather day (day)	1	3	4	6	13	18	3	10	1	34	

출 농도 및 유출상관관계를 살펴보기 위한 그래프로 SS의 유출 농도에 대하여 각 중금속의 유출 농도를 함께 나타내었다. 분석된 중금속은 차체 마모 성분에 의한 것과 포장재 마모입자에 의한 물질들로 분석된 수치는 거주지 및 상업지구 등 다른 토지 이용지역과 비교할 때 중금속의 농도가 2 ~ 6배까지 높게 나타났다(최 등, 2002). 또한, SS와 중금속의 유출 경향이 유사한 것을 확인할 수 있다. 각각의 상관관계는 Cu의 경우 0.86, Cr 0.78로 높은 값을 나타내었다. 이것은 중금속이 SS에 흡착된 형태로 유출된다는 기존의 연구(William et al., 1981; Robert et al., 1995)와 일치하는 결과라 판단된다. 그리고 유사한 강우 조건의 오염물질 유출 농도를 비교함으로써 오염물질의 유출에 영향을 미치는 강우 조건을 파악할 수 있다. 8월 19일과 11월 12일 강우의 경우, 이전 건기일수가 1일로 동일하지만 강우강도가 22mm/hr, 3mm/hr로 달라 8월 19일의 오염물질의 유출이 더 많은 것을 볼 수 있다. 또한 8월 19일과 9월 5일 강우를 비교하였을 때 이전 건기일수가 각각 1일과 3일로 8월 19일의 이전 건기일수가 적음에도 불구하고 22mm/hr, 16mm/hr로 강우강도가 높음으로 인해 오염물질의 유출이 더 많이 일어난 것을 볼 수 있다. 이것은 강우강도가 오염물질의 유출에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있게 하는 결과이다. 이후 오염물질의 유출에 강우강도 단독으로 미치는 영향을 알아보기 위한 실험을 진행하였다. 2004년 2월 21일의 경우, 유출 오염물의 농도가 이전 강우의 오염물질 유출농도보다 큰 이유는 한국의 특성상 겨울철에 강우가 없어 노면에 오염물질이 축적될 시간이 많았기 때문인 것으로 생각된다.

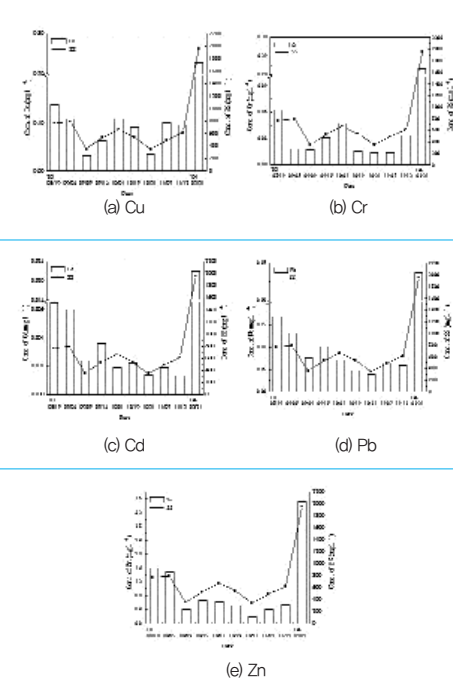
2.2.2 강우강도에 따른 SS의 유출 특성

강우강도란 단위시간(1시간)에 내리는 강우의 양을 말하는 것으로 mm/hr로 나타낸다. 강우강도는 오염물질의 유출현상에 크게 기여하는 것으로 판단되나 실제 노면에서는 일정한 강우강도의 강우가 내리지 않음으로 유출 특성을 파악하기 쉽지 않다. 따라서 본 실험에서는 각 강우강도를 모사하여 오염물질의 유출 특성을 파악하고자 하였다. Table 3은 모형도를 오염시키기 위해 사용한 노면유출수 내의 SS양과 실험 후 유출된 SS양

Table 2. The characteristics of road runoff at the first rainfall

Items		Concentration
pH		7.2~8.8
Electric conductivity(mS/cm)		0.5
Turbidity(NTU)		50~512
SS(mg/L)		145~650
Heavy metal (mg/L)	Cu	0.033~0.728
	Cr	0.014~0.281
	Pb	0.048~0.538
	Cd	0.001~0.023
	Zn	0.189~3.510
PAHs (μg/L)	Naphthalene	0.28~0.67
	Acenaphthylene	0.16~0.94
	Acenaphthene	0.21~0.24
	Fluorene	0.09~1.42
	Phenanthrene	0.15~8.56
	Anthracene	0.13~9.81
	Fluoranthene	0.11~6.24
	Pyrene	0.13~7.71
	Benz[a]anthracene	0.19~1.17
	Chrysene	0.13~1.92
	Benzo[b]fluoranthene	0.14~5.77
Benzo[k]fluoranthene	0.11~5.34	
Benzo[a]pyrene	0.14~1.75	

Fig. 2. Runoff concentration of SS and heavy metal of road surface runoff.



을 나타내었다. 사용한 노면유출수의 SS양은 252.6 ~ 352.5mg이었으나 실제 유출된 SS는 오염 총량의 41 ~ 66%였다. 이것은 실험 도중 모형도로 유출부 근처에서 SS가 유출되지 못하고 모여 있는 현상 때문인 것으로 생각되며, 실제 도로노면에서 우수받이 옆의 연석(경계석) 바로 아래 부분에 SS 및 기타 오염물질이 퇴적되어 있는 현상과 동일하다고 판단된다.

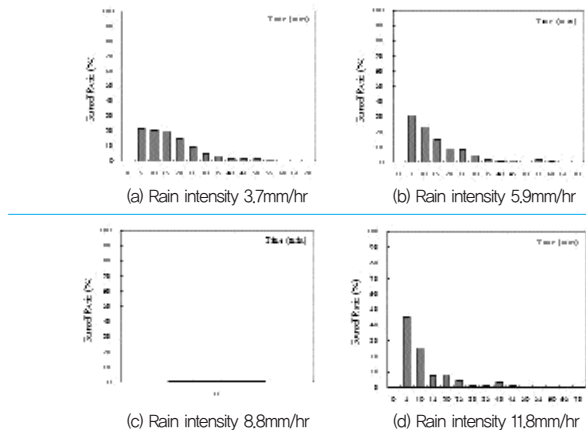
Fig. 3은 강우강도에 따른 오염물질의 유출현상에 대한 것을 나타낸 것이다. 노면을 오염시킨 SS양이 다르기 때문에 강우강도별 유출현상을 비교하기 위하여 각각을 백분율로 표시하였다. 강우강도가 3.7, 5.9, 8.8, 11.8로 높아질수록 오염물질의 초기 유출 현상이 두드러지는 것을 관찰할 수 있다. 총 유출 SS의 80%가 유출되는 시간은 강우강도 3.7mm/hr에서 23분, 5.9mm/hr에서 20분, 8.8mm/hr와 11.8mm/hr에서 15분이 소요되는 것으로 관찰되어 강우강도가 높아질 수록 오염물질의 유출이 빨라지는 것을 확인하였다.

Table 3. Outflow characteristics of SS according to the rain intensity

Rain intensity (mm/hr)	3.7	5.9	8.8	11.8
Total polluted SS (mg)	252.6	254.5	352.2	281.6
Total SS runoff (mg)	102.6	115.4	202.0	184.6
Runoff ratio (%)	41	45	57	66

Fig. 4는 시간 변화에 따른 강우강도별 SS 유출량의 변화를 나타낸 것이다. 시간에 따른 유출 변화를 살펴보기 위하여 기존에 실험한 4개의 강우강도에 2.9, 15.5, 21.3mm/hr에 대하여 추가적으로 실험하였다. 0 ~ 5분 동안 SS의 유출 현상을 살펴보면 강우강도 21.3mm/hr에서 유출이 가장 많이 일어났다. 그러나 시간이 지나면서 최고 유출이 일어나는 강우강도가 점점 낮아지며 15 ~ 20분에는 3.7mm/hr에서 SS 유출출량이 가

Fig. 3. Runoff phenomena of SS according to the rain intensity.



장 많아지는 것을 관찰할 수 있다. 20분 이후의 시간에 대해서는 대부분의 강우강도에서 유출되는 SS의 양이 일정한 수준에 도달하였다. 이것은 불투수층의 면적이 넓어 오염물질의 초기 유출 현상이 두드러진다는 도시지역 비점오염원 유출 특성 (Michael et al., 1998; Torben et al., 1998; John et al., 1997)과 일치하는 결과로 높은 강우강도의 경우, 오염물질의 유출이 두드러져 시간이 경과할수록 유출되는 오염물질의 양이 급격히 감소한다. 반면 낮은 강우강도의 경우, 오염물질의 유출이 초기 20~30분 동안 지속적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있는 결과라 판단된다.

오염물질의 유출이 가장 많이 일어나는 강우강도를 도출하기 위하여 각 강우강도에 따른 SS 유출 변화량을 Fig. 5에 나타내었다. 각 강우강도에서 오염물질의 유출이 가장 두드러진 초기 0~5분 동안의 유출량을 백분율로 환산하여 이용하였다. X축은 강우강도를 나타내며 Y축은 특정 강우강도(MI)의 SS 유출량에서 그 이전 강우강도(MI-1)의 유출량을 뺀 값으로 강우강도의 증가에 따른 SS의 유출 증가량을 나타낸다. 계산 값에 대한 회귀식의 기울기가 (+)이면 MI과 MI-1의 유출량 차이가 큰 것을 나타내고, (-)이면 MI의 유출량이 MI-1의 유출량보다 소폭 증가한 것을 나타내며, 유출량의 변화가 적다는 것을 의미한다.

Fig. 5를 살펴보면, 낮은 강우강도에서 유출량은 강우강도가 높아질수록 증가하여 9~12mm/hr의 강우강도에서 최고점을 이룬다. 이후 강우강도가 높아질수록 오염물질의 유출량 증가폭은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 강우강도 9~12mm/hr가 오염물질의 유출이 크게 일어나는 기준 강우강도로 판단되며, 이것은 오염물질 유출에 영향을 미치는 최소 강우강도라고 보고된 강우강도 10mm/hr와 유사한 결과이다 (최 등, 1998).

Fig. 4. Runoff outflow according to the each per hour.

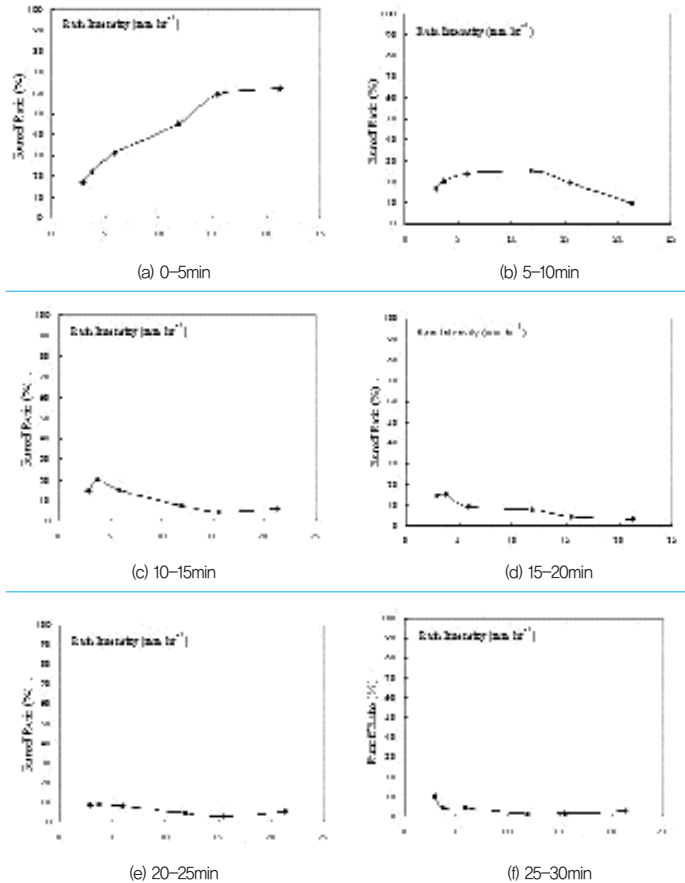
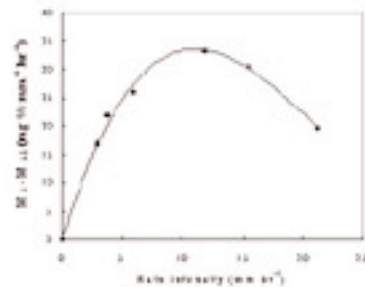


Fig. 5. Change of SS efflux according to the rain intensity.



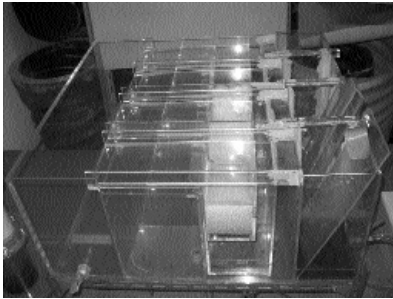
3. 노면 유출수 재이용 시스템의 배수 및 처리특성

3.1 연구방법

Fig. 6은 실험에 사용한 노면 유출수 처리장치를 나타낸 것이다. 처

리장치는 종래의 우수받이가 가지는 우수 저장 능력을 그대로 유지하면서, 여재에 의해 노면 유출수에 포함되어 있는 각종 오염물질을 효율적으로 제거·처리하여 하수처리의 부담을 줄이고 각종 수역오염을 감소시킬 수 있는 우수받이 기능을 갖는 장치이다. 처리장치는 실 장치의 1/4로 축소된 모형으로서 우수받이(1차 침전), 월류부, 처리조(2차 침전), 여재충전부(여과)로 구성하였으며, 유입 유량은 Air pump를 통해 1~20mm/hr의 강우강도에서 변화를 주어 유입시켰다.

Fig. 6. Schematic diagram of runoff treatment reactor.



여재충전부의 충전 여재는 Table 4와 같은 특성을 가지고 있는 발포프로필렌(J-P), 프로필렌 섬유(P-F), 다공성 스폰지(B-P)를 이용하였으며, 충전 높이는 10cm로 하였다. 노면 유출수의 유출 및 처리특성을 평가하기 위하여 노면 유출수 수질특성, 여재의 배수특성 및 SS, 중금속, PAHs의 처리특성을 살펴보았다.

3.2 결과 및 고찰

3.2.1 배수특성

1) 여재에 따른 강우강도별 처리장치의 배수특성 (강우강도별 1시간 연속운전)

Table 5는 여재에 따른 강우강도별 처리장치의 배수특성을 나타낸 것이다. 실험결과, 소수성인 J-P는 10mm/hr 이하의 강우강도에서 노면 유

Table 4. Characteristics of media

Media	Characteristics	Type
J-P	Matter : Polypropylene Porosity(%) : 80 Surface Area(m ² /m ³) : > 800 Particle Size(mm) : 1.0~3.0 Hydrophobic Property	Blowing
P-F	Matter : Polypropylene Size : 6 De (1 De : 1g/9000mm) Hydrophobic Property	Fiber
B-P	Matter : PVA Porosity Media Hydrophilic Property	Cubic & Sheet

출수가 월류되지 않고 여과부를 통하여 배수되는 것으로 나타났다. P-F와 B-P는 1mm/hr 강우에서부터 월류되는 현상이 나타났으며, 10mm/hr 강우강도에서 P-F는 24%, B-P 29%의 월류현상이 나타났다.

실험결과 J-P가 여과 배수의 안전성 확보에 용이한 것으로 나타났다. 이는 재질에 의한 것으로 친수성 소재보다 소수성 소재가 물의 흐름이 원활하여 배수능이 유리한 것으로 판단된다.

Table 5. Drainage characteristics of reactor

Rain intensity (mm/hr)	Input (ml/min)	Filtrated water (ml/min)			Over flow (ml/min)			Over flow ratio (%)		
		J-P	P-F	B-P	J-P	P-F	B-P	J-P	P-F	B-P
1	218.8	218.8	208.6	203.4	-	10.2	15.4	0	4.7	7.0
2	437.5	437.5	413.9	397.3	-	23.6	40.2	0	5.4	9.2
3	656.3	656.3	595.6	589.3	-	60.7	67.0	0	9.2	10.2
5	1093.8	1093.8	979.0	947.3	-	114.8	146.5	0	10.5	13.4
8	1750.0	1750.0	1405.6	1350.0	-	344.4	400.0	0	19.7	22.9
10	2187.5	2187.5	1668.6	1546.5	-	518.9	641.0	0	23.7	29.3
11	2406.3	2334.2	1824.3	1734.7	72.1	582.0	671.6	3.0	24.1	27.9
15	3281.3	2936.7	2426.6	2377.8	344.6	854.7	903.5	10.5	26.0	27.5
20	4375.0	3672.5	3350.6	3307.9	702.5	1024.4	1067.1	16.1	23.4	24.4

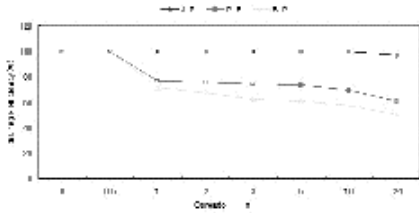
2) 처리장치의 배수특성 (강우강도10mm/hr 조건에서의 24시간 연속운전)

Fig. 7은 여재에 따른 강우강도별 처리장치의 배수능 평가에서 도출된 적정 강우강도인 10mm/hr 조건에서 24시간 연속운전한 배수특성을 나타낸 것이다. 연속운전 24시간은 실제 강우사상의 분석결과, 강우초기 30분 동안 초기 세척효과로 인하여 고농도의 오염물질이 유출되는 특징으로 볼 때, 실제 도로노면에서 강우강도 10mm/hr로 30분간 48회 내린 것으로 추정할 수 있다.

P-F와 B-P를 사용하여 운전한 결과, 운전시간 0.5시간부터 1시간 사이에 여재의 막힘 현상으로 월류량이 나타났으며, 24시간 운전 후 P-F는 약 40%, B-P는 50%의 월류량이 발생하였다. J-P는 안정된 배수능이 나타

나 24시간 연속 운전 시 97%로 배수능이 다른 두 여재에 비해 뛰어난 것으로 나타났다.

Fig. 7. Drainage efficiency of reactor.



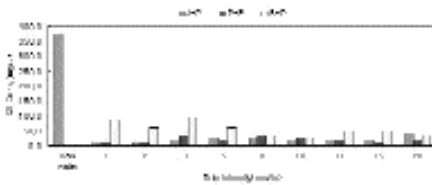
3.2.2 처리특성

Fig. 8~Fig. 10은 여재 종류에 따른 강우강도(1~20mm/hr)별 SS, 중금속, PAHs의 제거효율을 각각 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 SS 제거율은 J-P와 P-F가 비슷한 제거율을 보인 반면 B-P는 다른 두 여재보다 낮은 제거율을 보였다. J-P와 P-F는 94%, B-P는 77%의 제거율을 나타냈다.

B-P는 강우강도가 낮을 때에 비해 높은 경우에 제거효율이 좋은 것으로 나타났다. 이것은 운전시간이 경과함에 따라 여재의 막힘 현상으로 인한 월류량의 상승 때문에 실제 여과부로 유입되는 유입량의 저감으로 인하여 실제 오염물질의 유입량이 낮기 때문에 나타난 결과로 판단된다.

J-P와 P-F는 전 강우강도에서 90% 이상의 처리효율을 나타냈다. J-P는 배수능과의 연관성을 고려하면 시간이 경과함에 따라 여재의 흡착능과 더불어 여재에 Trap된 SS에 의해 이차적인 여과효과로 인한 것으로 사료된다. P-F는

Fig. 8. SS removal efficiency by media.



B-P와 같이 높은 강우강도에서 배수능이 저하되는 현상이 나타나 처리용량과 처리 효율 면에서 J-P보다 불리한 것으로 판단된다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이 중금속 제거효율은 P-F가 다른 두 여재 보다 높은 것으로 나타났다. 이는 P-F가 상대적으로 다른 두 매질 보다 비표면

Fig. 9. Heavy metal removal efficiency by media.

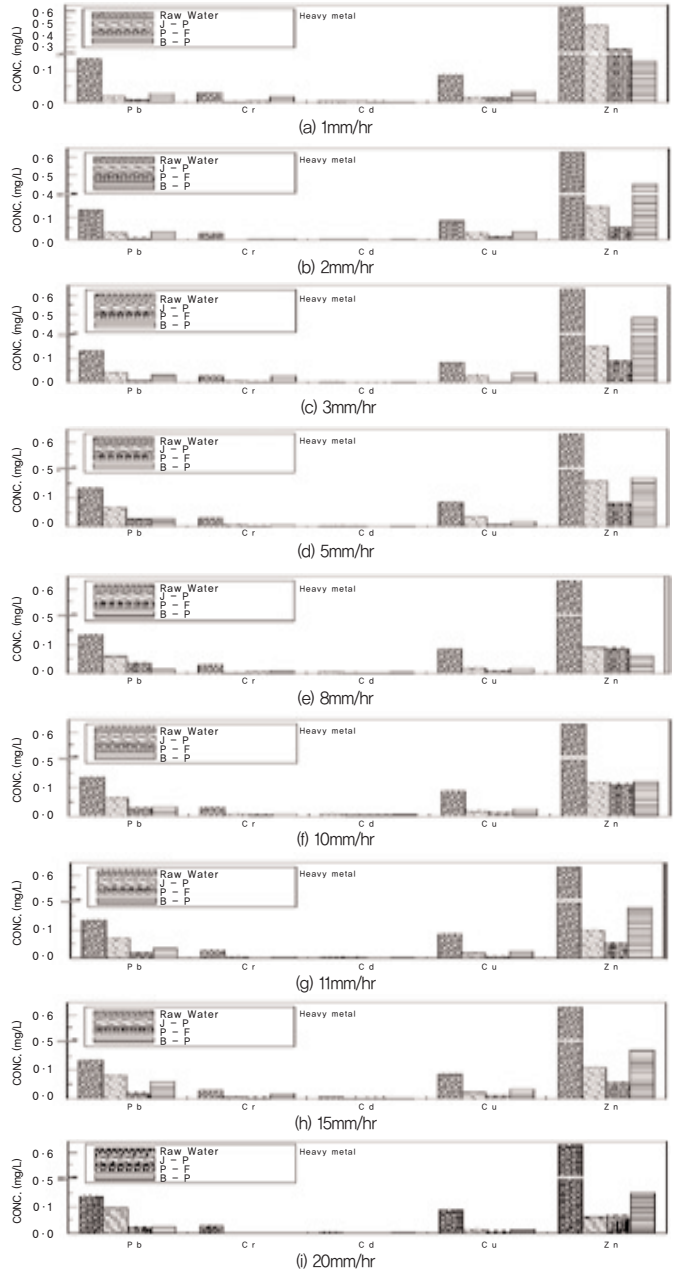
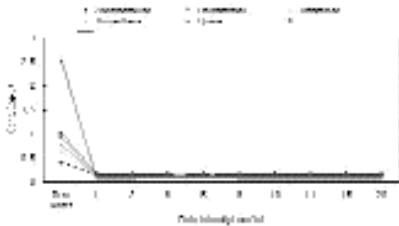
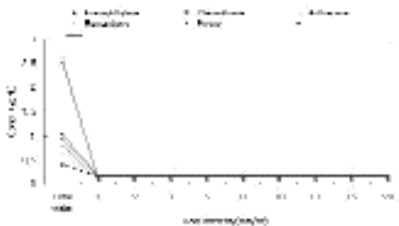


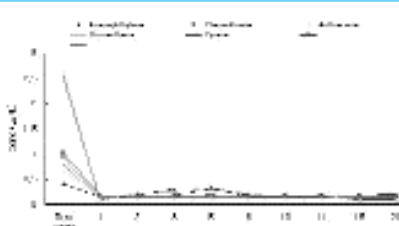
Fig. 10. PAHs removal efficiency by media.



(a) J-P



(b) P-F



(c) B-P

적이 큰 Fiber 형태로 이루어져 중금속의 흡착에 큰 영향을 준 것으로 사료된다. P-F에서 Zn의 제거율은 강우강도 1mm/hr에서 85%를 나타냈고, 20mm/hr의 강우강도에서는 약 90%의 제거율을 나타냈다. Pb, Cr, Cu의 제거율은 강우강도의 변화와 상관없이 80% 이상의 제거율을 나타냈다. PAHs의 제거율은 Fig. 10에서 알 수 있듯이 여재에 관계없이 66~97%로 나타나 PAHs의 제거가 양호한 것으로 판단된다.

4. 노면 유출수 재이용 시스템의 현장 적용성

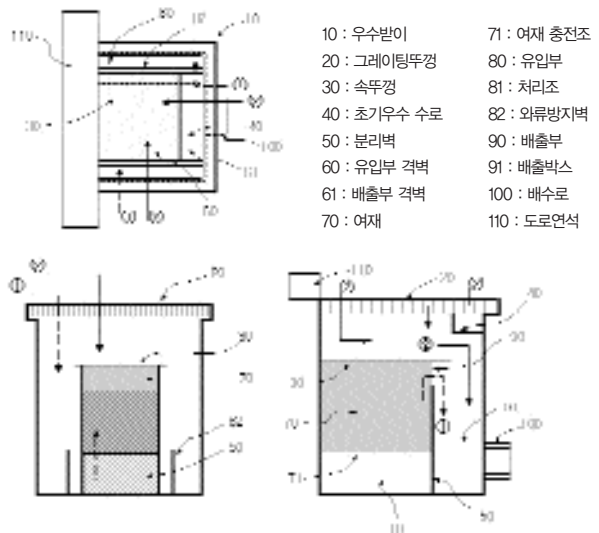
비점오염원으로서의 노면 초기우수 유출수는 일정하게 배출되는 하·폐수와는 달리 간헐적으로 배출되고 계절에 따른 유량의 차이가 크

다. 초기우수 유출수의 오염물질 농도는 지역특성, 강우강도, 생기빈도에 큰 영향을 받으며, 특히 초기세척효과로 강우초기에 고농도의 유출수가 발생하고 강우가 지속됨에 따라 오염물의 농도는 점차 줄어들어 아주 낮거나 검출한계 이하가 된다. 따라서 초기우수 유출수를 처리하기 위해서는 대용량의 처리장치보다는 고농도의 오염물을 함유한 초기우수만을 선택적으로 처리할 수 있는 소형 처리장치가 보다 효과적일 수 있다.

본 고에서 소개한 노면 유출수 재이용 시스템의 원리는 Fig. 11의 ①과 Fig. 12의 (1)에서 알 수 있듯이, 강우량이 처리장치의 설계 강우량 이하면, 고농도의 오염물질을 함유한 도로노면 초기우수는 빗물받이로 유입되면서 비중이 큰 입자상 물질은 침강하고, 유입수는 월류벽을 넘어 여재 충전조로 이동하여 중금속, 유류 및 내분비계 장애물질 등은 여재(Polypropylene 등)의 여과 및 흡착 작용을 통하여 제거된다. 오염물질이 제거된 우수는 빗물받이의 배출박스를 통하여 배수관이나 습지로 배출되어 수자원으로 재이용할 수 있다. 강우량이 처리장치의 설계 강우량을 초과하면, Fig. 11의 ②와 Fig. 12의 (2)에서 알 수 있듯이, 오염물질 농도가 낮은 우수는 먼저 유입된 우수에 의해 처리조로 유입되지 않고 속뚜껑 윗부분을 흘러 배출박스로 유출되고 배수관이나 습지로 배출되어 수자원으로 재이용할 수 있다.

본 시스템은 수두 차 및 유입수의 관성력을 이용하기 때문에 무동력으로 처리가 이루어지며, 초기우수만 선택적으로 처리할 수 있어 소요부지가 적게 요구된다. 따라서 에너지 비용이 고가이고 가용 토지가 제한적

Fig. 11. Runoff treatment reactor.



인 국내여건에 적합하다고 할 수 있다. 처리장치가 간단하고 PVC 등으로 만들 수 있어 시공 및 유지관리 비용을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 중금속, 내분비계 장애물질 등 주요 처리대상 물질의 제거효율이 66~97%인 것으로 나타나고 있다.

최근, 우리나라에서도 초기강우에 의한 오염물질 유입에 따른 하천수질 악화를 방지하고 상수원 개선을 위하여 초기강우에 의한 오염물질 유

Fig. 12. Field application of runoff treatment reactor



입을 저감시킬 수 있는 국내외 기술이 설치되고 있다. 또한, 도로(교량 포함)를 비롯한 주차장, 우수의 토양침투 시에도 초기우수 처리에 대한 법적 규제를 제정하고자 하는 현 시점에서 노면 유출수 재이용 시스템은 환경기술 및 사회경제적인 면에서 중요하다고 할 수 있다.

5. 결론

도시 내 비점오염원의 가장 큰 부분을 차지하고 있는 노면 유출수의 효과적인 처리를 위하여 초기우수만을 선택적으로 처리할 수 있는 처리장치를 개발하여 처리장치의 적용성을 평가한 연구의 결론은 다음과 같다.

5.1 노면 유출수 유출 특성

도시 내 비점오염원의 가장 큰 부분을 차지하고 있는 도로 노면배수의 효과적인 처리를 위하여 초기우수만을 선택적으로 처리하고자 강우강도에 따른 유출특성을 평가한 본 결과 다음과 같은

결론을 얻었다.

1) 강우시 도로노면유출수의 중금속은 SS와 유사한 유출현상을 나타내었으며, 다양한 강우인자 중 강우강도가 오염물질 유출에 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

2) 오염물질의 유출에 영향을 미치는 강우강도에 대해서 SS의 유출에 미치는 영향을 살펴보고자 강우강도를 조절하여 SS의 유출현상을 살펴 보았다. 강우강도가 3.9, 5.7, 8.8, 11.8mm/hr 로 높아질수록 SS의 유출량이 41, 45, 57, 66%로 증가하는 것이 관찰되었다.

3) 아스팔트로 포장한 모형도로의 SS는 강우시 초기유출 현상이 나타났다. 낮은 강우강도인 3.9mm/hr에서 총 유출 SS의 80%가 유출되는데 23분이 소요되었으며, 높은 강우강도인 11.8mm/hr에서 총 유출 SS의 80%가 유출되는데 걸린 시간은 15분이었다.

4) 인공강우 분사 시작 후 5분 동안 유출된 SS양을 이용하여 각 강우강도의 SS 유출 증가분을 확인하였다. 강우강도 9 ~ 12mm/hr에서 SS 유출 증가분이 가장 컸으며, 더 높은 강우강도에 대해서는 증가분이 감소하는 경향을 보였다. 이는 초기우수를 처리하기 위한 설계 강우강도를 설정할 때 많은 유출이 이루어지는 9 ~ 12mm/hr 강우강도를 고려해야 할 것으로 판단된다.

5.2 노면 유출수 재이용 시스템의 배수 및 처리특성

노면의 경우 도시 내에서 차지하는 면적이 클 뿐만 아니라, 차량 등의 이동으로 오염물질의 퇴적이 발생하여 비점오염원으로서 관심의 대상이 되어왔다. 비점오염원 유출수는 초기에 다량의 오염물을 함유하고 있는 특징이 있어 이의 처리가 필요하다. 본 연구에서는 노면 유출수 처리장치 개발을 위해 여재에 따른 노면 유출수의 배수 및 처리특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 처리장치의 배수능 실험 결과, J-P는 강우강도 10mm/hr이하에서 노면 유출수가 월류되지 않고 여과부를 통하여 처리되는 것으로 나타났다. P-F와 J-P는 1mm/hr강우에서부터 월류되는 현상이 나타났으며, 강우강도 10mm/hr에서는 P-F는 24%, B-P는 29%의 월류현상을 나타내, J-P가 배수의 안전성 확보에 용이할 것으로 판단된다. 또한, 강우강도 10mm/hr에서 24시간 연속운전한 결과, 소수성인 J-P가 안정된 배수능이 나타나, 24시간 연속운전 후 97%의 배수능이 나타났다. 운전의 안정성 면에서 J-P가 우수한 것으로 나타났다.

2) 여재에 따른 강우강도(1~20mm/hr)별 처리특성 실험 결과, SS 제거율은 J-P와 P-F는 94%, B-P 77% 나타났다. J-P는 배수능과의 연관성

을 고려하면 시간이 경과함에 따라 여재의 흡착 능과 더불어 여재에 Trap된 SS에 의해 이차적인 여과효과로 인하여 제거율의 안정성이 높은 것으로 나타났다. P-F와 B-P는 높은 강우강도에서 배수능이 저하되는 현상이 나타나 처리용량과 처리효율 면에서 J-P보다 불리할 것으로 판단된다.

중금속 제거효율은 P-F가 다른 두 여재보다 높은 것으로 나타났다. 이는 P-F가 상대적으로 다른 두 여재보다 비표면적이 큰 Fiber 형태로 이루어져 중금속의 흡착에 영향을 준 것으로 판단된다. P-F에서 Zn의 제거율은 강우강도 1mm/hr에서 85%를 나타냈고, 20mm/hr의 강우강도에서는 약 90%의 제거율을 나타냈다. Pb, Cr, Cu의 제거율은 강우강도의 변화와 상관없이 80% 이상의 제거율을 나타냈다. PAHs의 제거율은 여재에 관계없이 66~97%로 나타나 PAHs의 제거가 양호한 것으로 판단된다.

비점오염원으로서의 노면 초기우수 유출수는 일정하게 배출되는 하·폐수와는 달리 간헐적으로 배출되고 계절에 따른 유량의 차이가 크다. 초기우수 유출수의 오염물질 농도는 지역특성, 강우강도, 생기빈도에 큰 영향을 받으며, 특히 초기세척효과로 강우초기에 고농도의 유출수가 발생하고 강우가 지속됨에 따라 오염물의 농도는 점차 줄어들어 아주 낮거나 검출한계 이하가 된다. 따라서 초기우수 유출수를 처리하기 위해서는 대용량의 처리장치보다는 고농도의 오염물을 함유한 초기우수만을 선택적으로 처리할 수 있는 소형 처리장치가 보다 효과적일 수 있다.

노면 유출수 재이용 시스템은 수도 차 및 유입수의 관성력을 이용하기 때문에 무동력으로 처리가 이루어지며, 초기우수만 선택적으로 처리할 수 있어 소요부지가 적게 요구된다. 따라서 에너지 비용이 고가이고 가용 토지가 제한적인 국내여건에 적합하다고 할 수 있다. 처리장치가 간단하고 PVC 등으로 만들 수 있어 시공 및 유지관리 비

용을 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 중금속, 내분비계 장애물질 등 주요 처리대상 물질의 제거효율이 66~97%인 것으로 나타나고 있다.

최근, 우리나라에서도 초기강우에 의한 오염물질 유입에 따른 하천수질 악화를 방지하고 상수원 개선을 위하여 초기강우에 의한 오염물질 유입을 저감시킬 수 있는 국내외 기술이 설치되고 있다. 또한, 도로(교량 포함)를 비롯한 주차장, 우수의 토양침투 시에도 초기우수 처리에 대한 법적 규제를 제정하고자 하는 현 시점에서 노면 유출수 재이용 시스템은 건전한 도시물순환 관점에서 중요하다고 할 수 있다.

국내 환경기술은 공공수역의 수환경 보전을 위해 점오염원을 제어 하는데 주력해 왔으나, 효율적인 공공수역의 수환경 보전을 위해서는 점오염원의 관리와 함께 비점오염원에 대한 관리가 반드시 필요하다. 비점오염원을 효과적으로 제어하면 공공수역의 수질을 개선할 수 있으며, 더 나아가 효과적인 물 사용과 연결될 수 있다. 우리나라는 현재 비점오염원 제어를 위한 관리 대책이 시행되고 있다. 비점오염원 처리장치의 적용 및 개발이 활성화되길 기대한다.

참고문헌

이평구, 김성환, 윤성택, 도로변 우수관 퇴적물의 중금속오염 (I) 서울시 동부지역, 한국지하수토양환경학회지, 6(4), pp. 25~40 (2001).

정부 합동, 4대강수계 물관리종합대책 (1998~2000)

최상일, 박준형, 조장환, 포장면 유출 빗물의 특성 변화, 한국물환경학회지, 19(1), pp. 83~90 (2003).

최지음, 비점오염원의 제도적 관리방안 연구, 한국환경정책·평가연구원 연구보고서 (1999).

최지음, 신창민, 비점오염원 유출 저감을 위한 우수 유출수 관리방안, KEI 연구보고서 (2002).

최지음, 신은성, 농업지역 비점오염원 관리방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, 서울 (1998).

최지음, 신은성, 도시지역 비점오염원 관리방안 연구, 한국환경정책·평가연구원, 서울 (1997).

최지음, 신은성, 이동훈, 서울 도시지역의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국물환경학회지, 15(3), pp. 315~323 (1999).

환경부, 팔당상수원 비점오염원 최적관리사업 기본계획 및 타당성조사 수립보고서 (2000)

海老瀬 潛一, 汚染物質の降雨時流出特性と 流出負荷量, 水質汚濁研究, 8(8), pp.31~36 (1985).

APHA, AWWA, WEF, Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 20th edition (1998).

Barrett, M. E., Irish, L. B., Malina, J. F., and Charbeneau, R. J., Characterization of highway runoff in Austin, Texas, Area, J. of the Environmental Engineering, ASCE, 124(2), pp. 131~137 (1998).

John J. S., and Wileven G. B., Partitioning and first flush of metals in urban, J. of Environ. Eng. 123(2), pp. 134~143 (1997).

Michael E. B., Lyn B. I. Jr., Joseph F. M. Jr., and Randall J. C., Characterization of Highway Runoff in Austin, Texas, Area, J. of Environ. Eng., 124(2) pp. 131~137 (1998).

Peter C. V. M., Barbara J. M., and Edward T. F., Urban Sprawl Leaves Its PAH Signature, Environ. Sci. Technol., 34(19), pp. 4064~4070 (2000).

Rebecca S. S., John C. C., and David R. A., Treatment of Parking Lot Stormwater Using a StormTreat System, Environ. Sci. Technol., 36(20) pp. 4441~4446 (2002).

Robert P., Richard F., Melinda L., and Michael B., Urban Stormwater Toxic Pollutants: Assessment, Sources, and Treatability, Wat. Environ. Res., 67(3), pp. 260~275 (1995).

Sartor, J. D., Boyd, G. B., and Agardy, F. J., Water Pollution aspects of street surface contaminants, Journal of WPCF, 46(3), pp. 458~467 (1974).

Torben L., Kirsten B., and Margit R. A., First Flush Effects in an Urban Catchment Area in Aalborg, Wat. Sci. Tech. 37(1), pp. 251~257 (1998).