

섬유필터를 사용한 강우유출수의 부유물질 제거 방법의 개발

Removal of Suspended Solids from Stormwater Runoff Using a Fabric Filter System

구영민 · 김재영 · 김병로* · 서동일[†]

Young Min Koo · Jaeyoung Kim · Byung Ro Kim* · Dongil Seo[†]

충남대학교 환경공학과 · *명지대학교 환경에너지공학과

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

*Department of Environmental Engineering and Energy, Myongji University

(Received March 5, 2015; Revised March 18, 2015; Accepted March 31, 2015)

Abstract : Non-point source pollution associated with suspended solids in stormwater has been known to often adversely affect surface water ecosystems. Various methods of treating stormwater in the basin area before the stormwater reaches the receiving body of water have been developed. However, these treatment methods tend to be costly to install and also to maintain. In this study, an economical way of removing TSS (total suspended solids) from stormwater runoff with a fabric filter system was developed. Polyester was chosen as a fabric-filter material, because it was found to be economical in cost and relatively resistant to various chemicals. An experimental device was developed and used to determine filtration rates through polyester fabric samples of a series of several pore-opening sizes (20 μm to 94 μm) under a series of water-heads (0.25 to 1 m). It was found that the filtration rate increased as the size of water head increased. It was also found that the smaller the pore size of the fiber filter was, the higher the TSS removal efficiency was. However, the TSS removal efficiency was not found to be much different among the filters with different sizes of pore opening due to the fact that most mass of TSS was associated with large particles.

Key Words : Non-point Source, First Flush, Stormwater Treatment, Suspended-Solids Removal, Fabric Filter, Integrated Water Resources Management

요약 : 강우시 표면유출에 의해 지표수에 유입되는 우수에는 토사를 포함한 각종 비점오염 물질이 다량 포함되어 있으며 이는 지표수의 수질관리에 부정적인 영향을 미치고 있다. 유역의 오염물질이 수계에 도달하기 전에 처리하는 것이 바람직하며 따라서 강우유출수를 처리하는 다양한 방법들이 시도되고 있다. 그러나 일반적인 빗물오염 제어시설 및 장치들은 설치 및 유지관리를 위해 많은 노력과 비용을 요구하는 문제점 가지고 있다. 본 연구에서는 유역의 초기우수에 의한 오염을 제어하기 위해 경제적으로 타당하고 설치 및 관리가 용이한 섬유 필터를 이용하여 부유물질을 제거할 수 있는 방법을 개발하였다. 여재는 경제적이면서 내구성이 우수한 폴리에스테르계열의 섬유 필터를 사용하였으며, 연구 대상지역 강우유출수의 입도분석 결과에 따라 20 μm ~94 μm 범위에서 다양한 공극의 여재에 대한 성능을 실험을 통해 분석하였다. 수두별 여과성능을 분석하기 위한 실험 장치를 고안 제작하여 필터 공극에 따른 섬유 필터의 TSS 제거 효율을 평가 하였다. 수두가 높을수록 여과속도가 증가하는 것을 확인하였으며 공극별 여과 속도를 측정하여 분석하였다. 섬유 필터의 공극 크기가 작을수록 TSS 제거 효율이 증가되었으나, 공극별 TSS 제거 효율은 대체적으로 양호하나 유사한 편으로서 TSS의 대부분의 질량은 입자의 크기가 큰 부분에 집중되어 있는 것이 주요 원인으로 분석된다.

주제어 : 비점오염원, 초기우수, 우수 처리, 부유물질 제거, 섬유 필터, 유역하천종합관리

1. 서론

강우시 빗물은 유역의 지표에 축적된 각종 오염물질을 씻어 내면서 다량의 오염물질을 하천 등 지표수로 이동시킨다.¹⁻³⁾ 도로, 주차장, 건물 지붕 등 소위 불투수지역을 많이 포함하는 도시 유역에는 지표에 도달한 빗물이 지하수로 전달되기 어려움에 따라 지하수위가 지속적으로 낮아지는 문제가 발생한다. 또한 도시에서는 홍수에 의한 침수피해를 대비해 최단시간에 하천으로 유출되도록 우수관을 설계함에 따라 도시의 유출수는 빠른 속도로 하천으로 이동하는 경향을 나타낸다.⁴⁾ 이와 같은 유출수는 유역표면의 토사와 차량의 바퀴나 브레이크 패드의 마모에 의한 잔재물 또는 고형 폐기물 등을 씻어 내려감으로써 다양한 도시의 오염물

질을 포함하게 된다.⁵⁾ 초기 세척효과(First Flush Effect)는 우수관 내 퇴적물 및 지표면에 축적된 오염물질의 많은 양이 초기우수에 의해 일시적으로 유입되는 현상을 지칭한다.⁶⁾ 도시지역에서는 소규모 강우에도 초기세척 현상이 쉽게 발생하는데 이는 불투수성 지표면적의 증가, 강우강도, 선행 건기일수 등의 영향을 받는다. 이 초기 세척 현상은 강우시 단시간에 막대한 오염물질을 도시하천 등 공공수역에 배출하여 환경오염피해를 가중시키고 있다.⁷⁾ 특히 도시유역에서는 강우 유출수에 의하여 35~80%의 비점오염물질이 초기 30% 유출수에 의하여 하천으로 유출되는 소위 초기 세척효과를 나타내는 것으로 보고되고 있다.⁸⁻¹²⁾ 미국 환경보호청에서는 이러한 강우 유출수 및 비점오염원을 제어하기 위하여 유역의 표면유출현상이 하천의 환경에 미치는 영향을 최

[†] Corresponding author E-mail: seodi@cnu.ac.kr Tel: 042-821-6679 Fax: 042-822-5610

소화할 수 있는 저영향개발(low impact development, LID)을 대안의 하나로 제시하고 있다.¹³⁾ 저영향개발에서 사용하는 방법들은 다양한 우수관리 전략과 요소를 도시계획 안에 포함시킴으로서 우수 유출수를 발생원 단계에서 분산식으로 관리하는 접근방법으로 요소기술은 자연의 침투 및 저류등과 같은 현상과 같은 기능을 인공적으로 설치하여 자연적인 순환 기능을 최대한 유지함으로써 유역에서 발생하는 지표수 유출을 지연시킴과 동시에 오염물질을 저감하는 기능을 포함하고 있다.

우리나라의 경우, 2010년 수질오염물질 전국 1일 배출량 중에서 비점오염원이 차지하는 비중이 BOD는 68.3%, T-P는 58.9%로서 4대강 전 수계에서 점오염부하량보다 비점오염 부하량이 높은 것으로 조사되었다. 특히 이 보고서는 2020년에는 BOD, T-P의 비점오염 부하량이 72.1%, 68.6%까지 증가할 것으로 예측하고 있다.¹⁴⁾ 환경부는 비점오염원을 제

어 및 관리하기 위해 유역으로부터 유입되는 오염물질의 총량을 규제하는 오염총량관리제를 도입한 바 있으며 비점오염물질을 관리하기 위하여 ‘수질 및 수생태계 보전에 관한 법률’이 또한 제정되어 시행되고 있다.¹⁵⁾ 우리나라에서도 유역 물순환 및 비점오염원을 통합적인 관리를 위해 LID 요소 기술을 적극 도입하고자 하는 추세에 있으며 다양한 비점오염 저감기술이 연구되고 있다.¹⁾ 일반적으로 비점오염 관리기술들은 일정 수준 이상의 면적으로 필요로 하므로 인구가 밀집되어 있는 도시 유역에서는 적용하기 어려운 문제점이 있다. 또한 현재 널리 사용되고 있는 모래 또는 여재를 사용하는 시스템은 강우 유출수에 포함하고 있는 미립자 등에 의해 막히는 현상이 자주 발생하고, 주기적으로 여재 일부 및 전부를 교체하거나 관리해야 함으로써 관리 노력 및 비용이 과다하게 요구되는 어려움이 있다.¹⁶⁾

본 연구는 초기우수에 의한 오염현상을 제어하기 위해 사

Table 1. Filter media experimental research trends for stormwater treatment

Source	Filter media	Media particle size and pore size	Experimental sample	Sediment removal efficiency (%)
Harpreet, S. K. ²⁵⁾	zeolite	0.5 mm, 5 mm	401 μm~448 μm	60
Krishna, R. Reddy. ²⁶⁾	biochar	3~3.2 mm	> 0.85 mm soil particles	85
Song, Y. W. and Rhee, S. K. ²¹⁾	• clay minerals • impregnated activated carbon	-	surface runoff	83,3 58,3
Mahed, A. Z. et al. ²⁷⁾	vegetation	-	premixed sediment	83~89
Johir, M. A. H. et al. ²⁸⁾	fiber filter	30~1000 mm	collected form stormwater channel	94~98
Horand, N. J. and Lowe, M. ²⁹⁾	• sand • glass • fine sand • sandy loam • sandy loam + Hydrocell	-	wastewater form the town	30 47.4~60.5 99±1 93±4 92±3
Belinda, E. Hatt, et al. ³⁰⁾	• sandy loam +vermiculite +perlite • sandy loam + compost+mulch • sandy loam+compost+	-	collected form impervious runoff	90±3 92±4 96±1
Bratieres, K. et al. ³¹⁾	• soil based filter • plants based filter	-	stormwater inlt pond sediment	97 98
Belinda, E. Hatt, et al. ³²⁾	gravel + sand	10.5 mm	stormwater inlt pond sediment	93,47
Carmen, A. Franks, ²⁴⁾	geotextile filter	50 μm, 106 μm	0~180 μm	69,5
Yoo, K. and Han, H. ²²⁾	• wasted tire • non woven fabric	-	collected form loadway runoff	50~81 80
Ahn, J., et al. ²⁰⁾	sand	0.93 mm 1.49 mm 0.93~1.49 mm	> 0.25 mm soil particles	89~99 74~96 89~98
Abdel, M. N. and Kamel, H. ³³⁾	sand • expanded polypropylene • zeolite (biocell)	0.15~0.6 mm 1~3 mm 6~8 mm	collected form surface runoff	58,3~91,9 37,3~42,1 4,5~6,5
Kim, H. J. ³⁵⁾	• zeolite • ferox • granular activated carbon	1~3 mm 1~3 mm 2.5~5 mm	artificial wastewater	37,9~49,3 36,7~43,6 19,3~22,7
Stephen, J. R. et al. ³⁴⁾	basalt, dolomite, calcite • Bowling type polypropylene	7~22 mm 1~3 mm	< 0.6 μm smectite	79~99 77
Kim, S. et al. ³⁶⁾	• Fiber type Polypropylene • Cubic & sheet type polyvinyl alcohol • Spherical expanded polypropylene	- - -	370 mg/L	94 94 60,5
Kang, S. W. et al. ³⁷⁾	• Crushed polypropylene • Large crushed expanded polypropylene • Small crushed expanded polypropylene	8~15 mm 1.5~3 mm 1.5~3 mm	Mixed with water and solids above the road	86,5 76,5 92,7

용되는 기존의 시스템에 비해 설치 및 유지관리에 효율적이면서 경제적으로 유리한 섬유필터 시스템을 고안하여 사용 가능성을 분석하기 위해 수행되었다. 대전 관평천의 유역에서 발생하는 강우 유출수를 자동채수장치를 이용하여 시간별로 채취하여 시료에 포함되어 있는 TSS의 유입특성, 입도 분포 등을 조사하고, 이 분포를 바탕으로 하여 모의 유출수를 제조하여 다양한 조건에서 섬유필터의 TSS 제거 효율을 분석하고자 하였다.

2. 연구동향

비점오염물질의 처리를 위해 제안되는 다양한 방법 중 토양여과기술은 투수성이 양호한 양질사토(Loamy Sand), 자갈, 부식토(Humus Soil) 등의 자연 여재를 이용하고 여과, 흡착 및 미생물 대사 작용에 의해 강우 유출수 내 부유고형물, 총인, 중금속 등에 대해 우수한 제거효과를 보이는 것으로 알려져 있다.^{17,18)} Table 1은 국내·외 우수관리 및 수질관리를 위해 오염원을 저감할 수 있는 각종 여재를 이용하여 실험한 연구 결과들이다. 모래를 이용하는 방법이 가장 많이 연구되고 있으며, 식생을 이용한 비점원 저감기술 또한 연구사례가 많은 편이다. 그 외, 재활용 유리 및 페타이어 등을 이용한 재활용 할 수 있는 여재를 이용한 연구들도 보고되고 있다.

Choi¹⁹⁾은 비점오염 저감을 위해 나뭇조각(woodchip), 모래, 자갈을 이용하여 여과 a와 침투(infiltration)기작을 응용한 기술을 개발하였으며, TSS (total suspended soil), 탁도, Pb, Zn의 제거 효율을 분석하고 입자상 및 중금속물질의 제거 효율이 80% 이상에 이르며 특히 우드칩의 흡착 능력이 높게 나타났다고 보고하였다. Ahn²⁰⁾은 조립토를 이용하여 3종류의 여과층을 구성하여 TSS와 COD (chemical oxygen demand)가 저감되는 효과를 실내 실험을 통해 평가하였으며, 이를 실제 빗물 저류조에 적용하여 현장 적용성을 검증한 바

있다. 실내 실험에 사용한 오염수는 서울시 도로 현장에서 채취한 시료를 이용하였으며, TSS 제거효율은 89%~98%, COD 제거효율은 96% 이상 높게 나타났다고 보고한 바 있으며 기타 실험 조건에서도 TSS 60.8%~99.9%, COD 81.1%~99.9%로의 범위로 각각 제거효율이 나타났다고 보고하였다.

Song²¹⁾는 비점오염 저감을 위해 다양한 미세기공을 갖고 있고 흡착능력이 뛰어난 다공성 점토광물을 이용하여 SS, COD, T-P, T-N의 제거 능력을 분석하고 폐수정화에 흔히 이용되는 침착활성탄(impregnated activated carbon) 필터와 비교분석하였다. Yoo²²⁾는 페타이어, 부직포, 스폰지로 구성된 프리필터를 제작하였다. 각각의 재료를 이용하여 층(layer)을 구성하고 각각의 층에서 SS, COD, TOC, 중금속, 탁도의 제거 효율을 측정하였다. 이 연구자들은 유량이 1.06 L/min 일 때 최고 제거효율로 관측되었다고 하였으며 20 µm 이상의 입자를 가진 물질은 90~100% 제거되었지만 20 µm 이하의 입자는 10%가 제거되었다고 보고한 바 있다.

본 연구에서는 지하, 저류지 또는 수체 안에 설치해서 비점오염원에서 오는 미립자를 제거할 수 있는 섬유필터(fabric filter)를 개발하는데 목적을 두고, 섬유필터의 TSS 제거 효율을 집중적으로 관찰하였다. Jung²³⁾은 공극크기가 100 µm, 200 µm, 500 µm인 세 가지 섬유필터를 폐수내의 유기물질 제거하는 방법으로 연구한 바 있으나, 비점원오염 및 하천수질 개선에 대한 응용은 진행되고 있지 않고 있다. Franks²⁴⁾은 도로 및 인도에서 발생하는 강우 유출수의 오염물질을 제거하기 위해 섬유(Geotextile) 필터를 이용한 실험실 규모의 실험을 하였는데 사용된 섬유의 공극크기가 작을수록 TSS 저감 효과가 높다는 결과를 발표하였다.²⁴⁾

3. 실험 준비

3.1. 섬유필터를 이용한 강우 유출수 수질 개선 시스템 개요

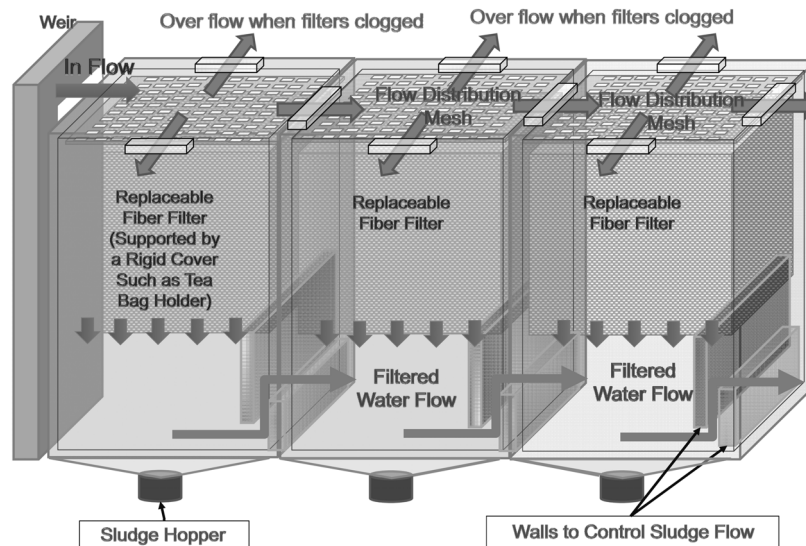


Fig. 1. Conceptual diagram of stormwater runoff treatment system using fabric filters.

Fig. 1은 본 연구진이 개발하고 있는 섬유 필터를 이용한 강우 유출수 오염저감 시스템의 개략도이다. 장치 왼편의 유입수는 우수거 출구 등 강우 유출수가 유입되는 부분을 나타내며, 처리 효율을 증가시키기 위해 협잡물 제거 장치나, 스크린 또는 침전 시설을 거친 후 유입이 가능하다. 섬유 필터는 상자형태의 프레임 내부에 진공청소기 주머니와 같이 장착될 수 있으며, 사용후에는 제거하여 청소하거나 교체가 가능하도록 고안될 예정이다. 필터를 거친 여과는 바닥 경사를 따라 흐르게 되어 집수되거나 방류된다. 한편 필터는 오염물질의 축적에 따라 폐색될 것으로 예상되므로 다수의 필터를 설치하며 유입 유속보다 여과 속도가 느려지는 경우 월류하여 다음 단계의 섬유 필터로 원수가 흘러갈 수 있도록 설계되었다.

3.2. 강우 유출수내 TSS 입자 분포 분석에 의한 시료의 특성

본 연구실은 대전 유성구에 2000년대 후반에 주거, 상업 및 산업 복합단지로 조성된 대덕 테크노 밸리를 관류하는 관평천으로 유입되는 우수 유출수의 유량과 수질을 자동적으로 모니터링하고 채수하는 연구를 지속적으로 수행한 바 있다.¹⁻³⁾ 위와 같은 연구에서 개발된 재동채수장치를 이용하여 관평천 우수지로 유입되는 강우시 유출수를 자동 채수 장치를 이용하여 1시간 간격으로 채수하고 Fig. 2에 나타난 바와 같이 시료의 입경 분포도를 조사하였다.

강우 유출수가 발생한 1시간 후에 채수된 시료에는 36 μm 의 크기를 가진 입자가, 2시간 후에는 15 μm , 3시간 후에는 13 μm 크기의 입자들이 각각 가장 많이 분포하는

것으로 분석되었다. Table 2에는 각 시료의 TSS의 누적입경 분포와 평균입경을 나타내고 있다. 입자들의 평균 입경은 유출 발생 1시간 후에는 22.95 μm 그리고 2시간 후에는 27.05 μm 로서 강우 발생 2시간 후가 약간 큰 것으로 조사되지만, 강우 발생 1시간 후의 입자들은 대부분 큰 입자들을 포함하고 있으며, 강우 발생 2시간 후 채취한 시료에서는 미세한 입자부터 큰 입자까지 고르게 포함하는 특징을 보이고 있었다. 강우 3시간 후에는 평균 입경이 9.90 μm 로 급격하게 감소되는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 초기 강우에 집중적으로 발생하는 비점원 오염물질을 제거하기 위한 방법을 개발하는 데 있어서 대상 시료를 강우 유출수 발생 1시간 후의 분포를 바탕으로 제조하여 제거 효율을 분석 실험에 사용하였다. 모의시료는 마른 모래를 채거름 작업을 통해서 입경별로 분류하고 본 연구에서 분석된 TSS 비율에 맞추어 혼합해서 제조하였다.

Table 2. Particle diameters selected from the cumulative size distributions curves in Fig. 2

Sample	Diameter at 10% ^{a)}	Diameter at 50% ^{b)}	Diameter at 90% ^{c)}	Mean diameter
1 hours after runoff	6.26 μm	18.60 μm	44.95 μm	22.95 μm
2 hours after runoff	4.16 μm	18.42 μm	63.22 μm	27.05 μm
3 hours after runoff	2.52 μm	9.09 μm	18.41 μm	9.90 μm

a) 10% of the particles is smaller than this diameter
 b) 50% of the particles is smaller than this diameter
 c) 90% of the particles is smaller than this diameter

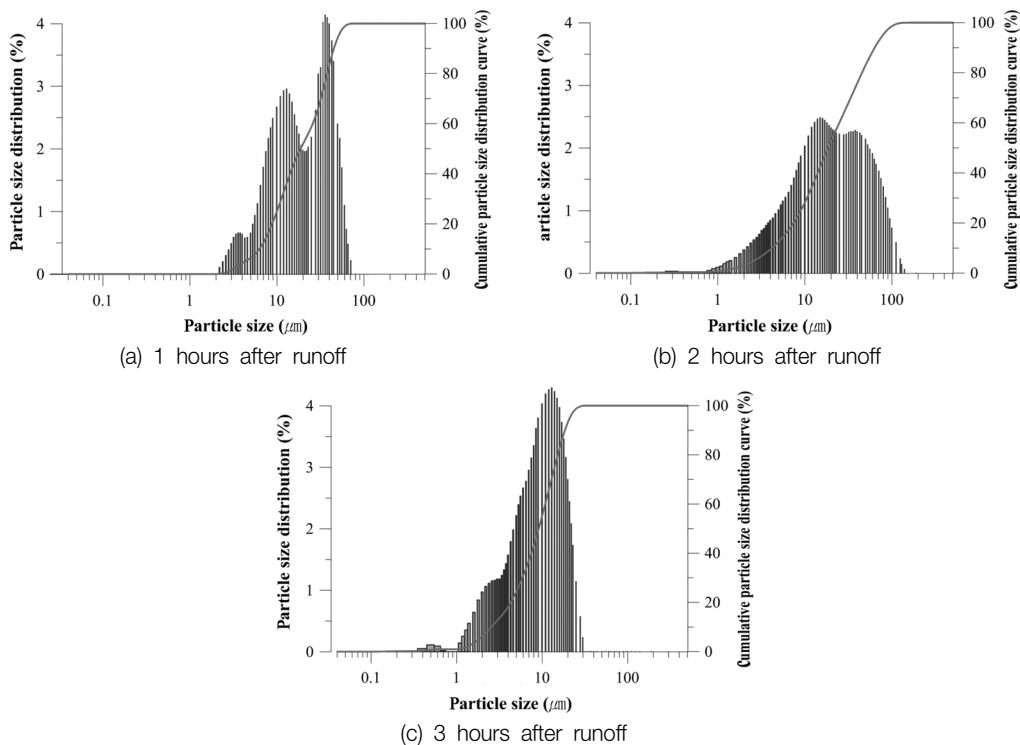


Fig. 2. Distribution of the particles contained in the runoff.

Table 3. Fiber characteristic^{39,40)}

Fiber	Tensile strength & ductility				Chemical resistance			
	Standard tensile strength (g/d)	Wet tensile strength (g/d)	Standard ductility (%)	Wet ductility (%)	Acid	Alkali	Bleach	Organic solvent
Cotton	3,0~4,9	3,3~6,4	3~7	-	△	▲	▲	●
Hemp	5,6~6,3	5,8~6,6	1,5~2,3	2,0~2,3	△	▲	▲	●
Wool	1,0~1,7	0,76~1,63	25~35	25~50	▲	△	△	●
Silk	3,0~4,0	2,1~2,8	15~25	27~33	▲	△	△	●
Rayon	1,7~2,3	0,8~1,2	18~24	24~35	△	△	△	●
Nylon	4~7	4,2~5,9	28~42	36~52	△	●	△	△
Polyester	4,3~6,0	4,3~6,0	20~32	20~40	●	▲	●	▲
Acrylic	3,5~5,0	2,0~4,5	12~20	25~60	●	●	●	△
Polyethylene	4,7~6,5	4,7~6,5	8~35	8~35	●	●	●	●
Polypropylene	4,5~7,5	4,5~7,5	25~60	25~60	●	●	●	△
Acetate	-	-	-	-	△	△	△	△
Polyurethane	-	-	-	-	●	●	△	△

●: Strength, ▲: Tolerance, △: Weakness

3.3. 섬유 필터 재료의 선택

본 연구에 사용될 섬유형 여재의 선택을 위해 문헌조사를 시행하였으며 종류별 특성은 Table 3에 나타난 바와 같다. 인장강도와 신도(伸度, Strain)와 같은 물리적 강도는 폴리프로필렌 > 나일론 > 폴리에스터 > 폴리에틸렌 등의 순서로 분석되었으며, 내약품성은 폴리에틸렌 > 폴리에스터 > 폴리프로필렌 > 아크릴 등의 순으로 분석되었다. 그러나 폴리프로필렌과 아크릴은 각각 Perchloroethylene (PCE)과 아세톤에 각각 약한 특성을 나타냄에 따라 본 연구에서 적절한 섬유는 폴리에스터, 폴리에틸렌 또는 폴리프로필렌 계열 등으로 판단되었다.

본 연구에서는 가격이 상대적으로 저렴하며, 쉽게 구할 수 있는 재료로 유지·보수에 대한 부담이 적은 장점이 있는 폴리에스터(Polyester, PET) 물질의 섬유 필터를 사용하기로 결정하였다. 폴리에스터 섬유는 일반적으로 강도가 강하며, 습윤시에도 나일론과는 달리 강도가 떨어지지 않는 장점을 지니고 있다. 또한 일반적인 합섬섬유 중에서 내열성이 매우 우수하고 산, 알칼리, 표백제, 유기용제 등 화학물질에 대한 내성이 강하여 의류, 인쇄용지 그리고 건축·토목자재 등에서도 널리 사용되고 있다.³⁸⁾ 본 연구에 사용한 폴리에스터는 섬유 판매점에서 쉽게 구할 수 있으며, 실험에 사용한 섬유 필터의 공극 크기는 Table 2의 결과를 참고하여 20 μm, 30 μm, 62 μm, 79 μm, 94 μm로 선정하여 실험 장치에 탈부착이 용이하도록 제작하여 사용하였다.

3.4. 실험 장치

본 실험은 섬유 필터의 공극별 그리고 수두별 TSS 저감 효과를 분석하기 위해 진행되었다. Fig. 3은 본 연구에서 개발한 실험 장치로서 서로 다른 필터를 장착할 수 있으며 주입되는 유량을 조절하여 수두를 유지시킬 수 있도록 고안하였다. 재질은 아크릴을 사용하였으며 높이 122 cm, 직경 5

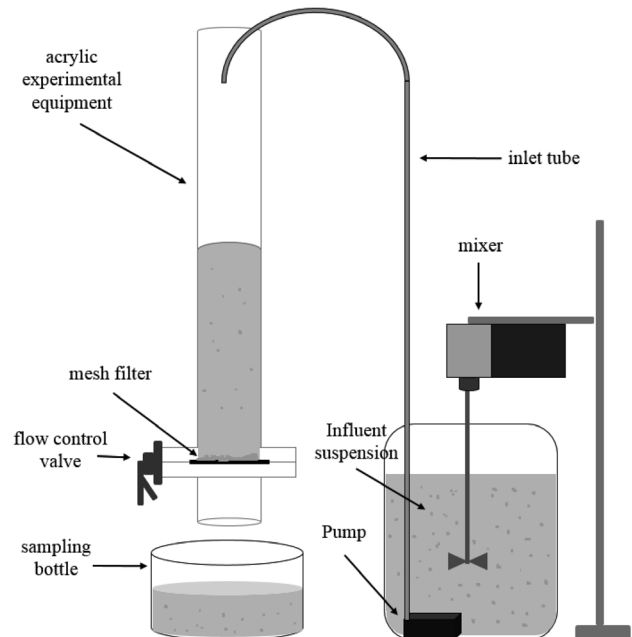


Fig. 3. Conceptual diagram of fiber filtration test system.

cm의 크기를 가지고 있다. 유입 유량을 일정하게 유지하기 위해 정량펌프를 사용 하였으며, 실험 중에도 원수의 오염 물질 농도를 일정하게 유지시킬 수 있도록 교반기를 사용 하였다.

3.5. 실험 방법

실험에 사용된 모의 우수는 TSS 농도가 500 mg/L가 되도록 25 L 크기의 저장 탱크에 제조하여 사용 하였으며, 수중펌프를 통해 일정한 유량으로 실험 장치로 유입되도록 하였다. 필터에 가해지는 수압이 지속적으로 유지될 수 있도록 실험장치 내부의 수위를 일정하게 유지하도록 펌프의 속도를 조절하여 실험을 수행하였다. Table 4에 나타난 바

Table 4. Conditions of fiber filtration rate experiment

Fiber mesh size	Water level above the filter	Initial suspended solids concentration
20 μm	0.25 m	500 mg/L
30 μm	0.50 m	
62 μm	0.75 m	
79 μm	1.00 m	
94 μm	1.00 m	

와 같은 실험조건(필터의 공극 크기, 수두, TSS 농도)을 조합하여 다수의 실험을 반복적으로 수행 하였으며 필터를 통과하는 유량을 시간별로 측정하여 기울기를 분석함으로써 여과유속을 산정하였다.

4. 실험결과 분석

4.1. 여과속도에 대한 수두의 영향

Fig. 4는 Table 4에 나와 있는 공극 크기와 수두 크기의 조합을 이용하여 여과실험을 수행한 결과를 나타낸다. 실험 시작 후 입자들이 섬유 필터에 빠르게 축적되면서 여과 초기의 여과속도가 5분 이내에 급격하게 감소되나 각각 일정한 값으로 접근하는 것으로 관찰되었다. 실제 현장에서 단 5분 동안의 효과로 유출수의 부유물질을 제거하기에는 무리가 있다고 판단되며 따라서 모든 실험에서 나타나고 있는 정상상태의 여과속도를 실제 속도로 보고 설계하는 것이 바람직하다고 판단하였다. Fig. 4에 나타난 결과를 바탕으로

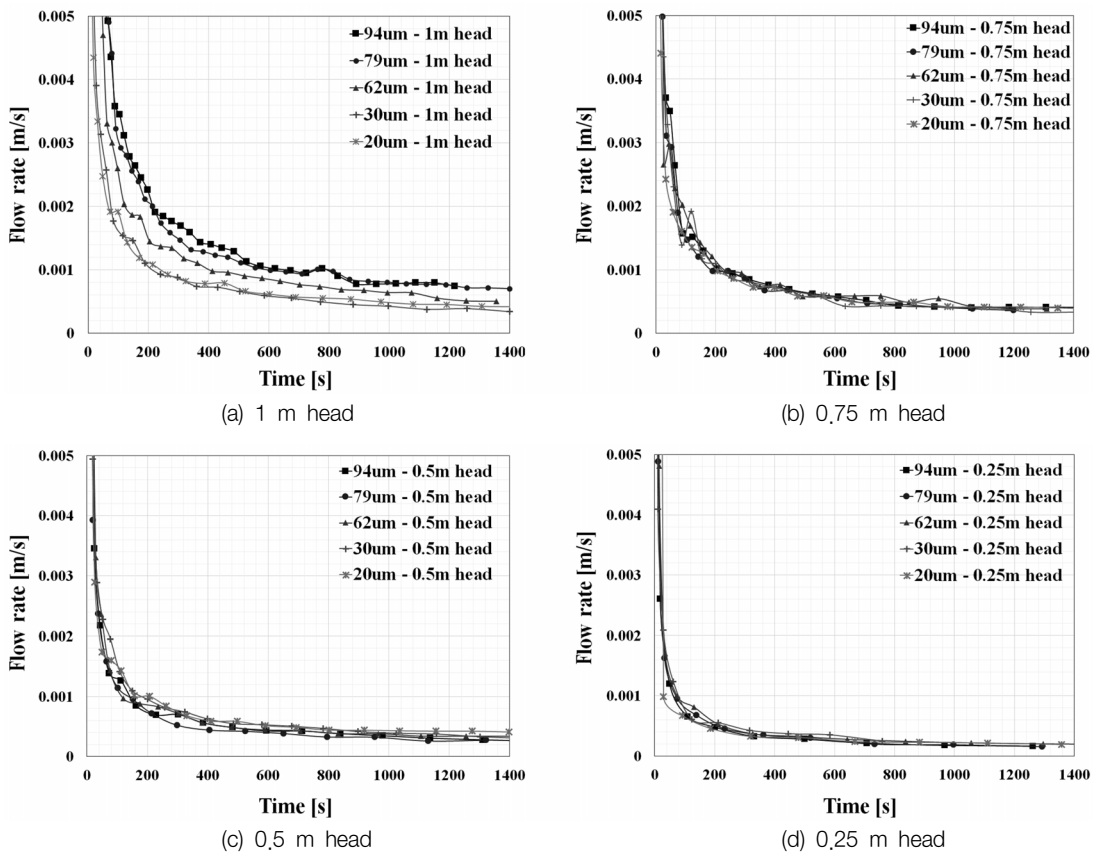


Fig. 4. Changes in filtration rate by water head for different mesh sizes.

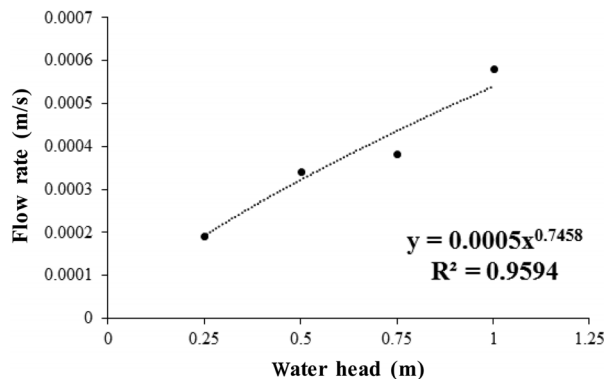


Fig. 5. Filtration rate vs water head relationship.

로 20분(1,200초) 이후의 여과 속도가 비교적 안정적이라고 보고 수두의 크기와 여과 속도와의 관계를 Fig. 5와 같이 정리하여 나타내었으며 수두크기가 높을수록 정상상태의 여과속도가 크다는 것을 알 수 있다.

4.2. 섬유 여재 공극 크기에 따른 여과 속도의 변화

여재의 공극 크기가 여과속도에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 4의 결과를 재구성하여 Fig. 6을 작성하였다. 앞서의 경우와 마찬가지로 방법으로 여과 시작 20분 경과 후 Fig. 7에 나타난 바와 같이 공극크기가 작을수록 여과속도가 감소하는 알 수 있다. 그러나 여과 개시 20분 이후의 여과속도는 섬유여재의 공극 크기에 영향을 받는다고 하기 보다는 필터위에 축적된 입자의 물리적 특성 또는 공극분포에

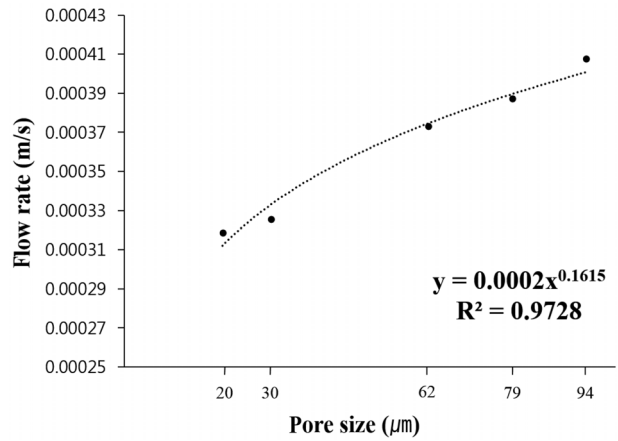


Fig. 7. Flow rate vs mesh size relationship.

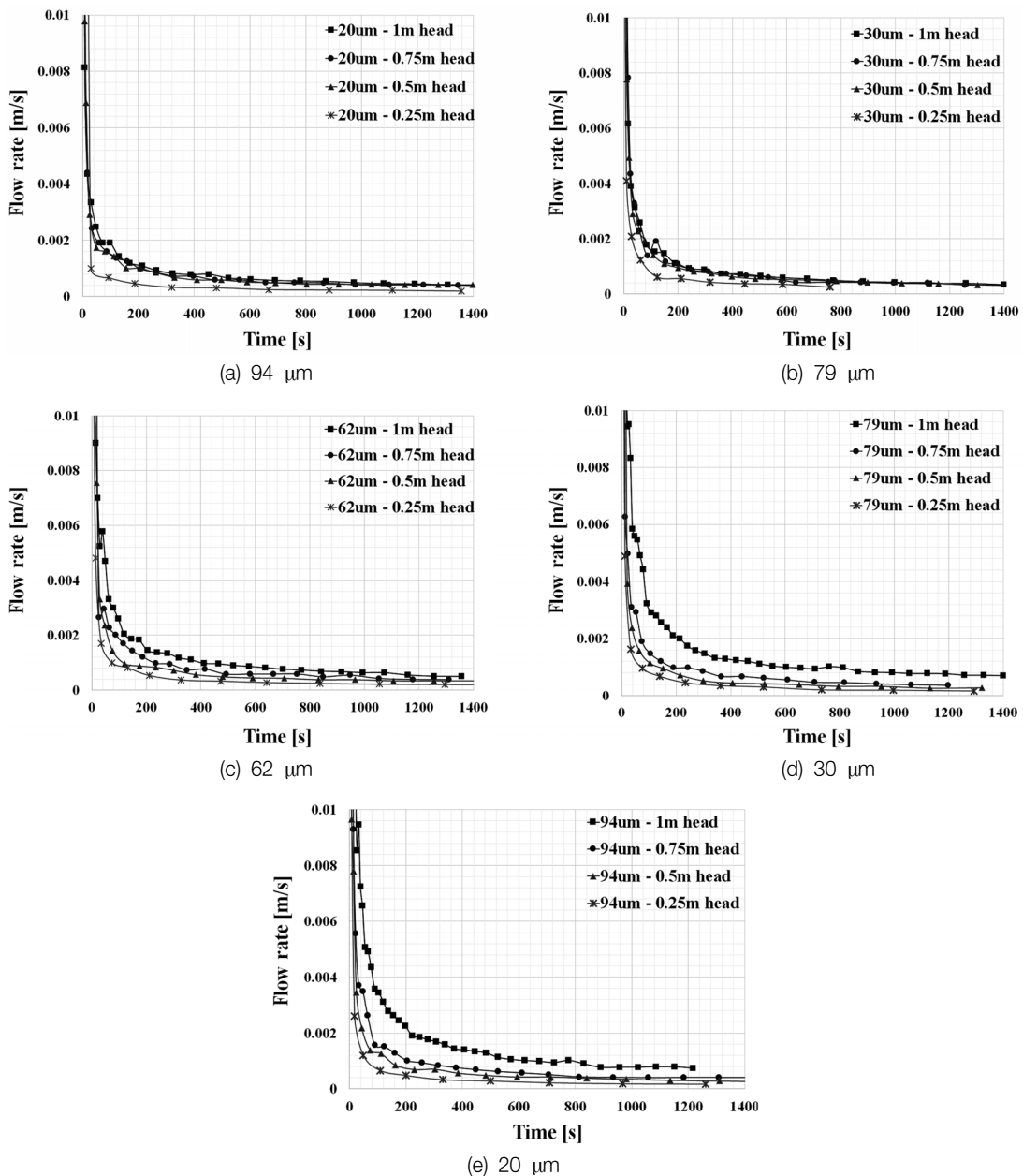


Fig. 6. Changes in filtration rate by mesh size for different water head.

이해 더욱 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 여과가 상당히 진행되어 필터위에 입자가 고루 축적된 이후에는 필터의 공극 크기는 각 경우에서 서로 비슷하여 그 다지 중요하지 않을 수도 있을 것으로 추정된다.

4.3. TSS 제거 효율

각 조건에서 섬유 필터를 통과한 시료를 20분 동안 수집하여 환경공정시험법에 의거하여 1.2 μm 유리섬유 필터를 이용하여 TSS 제거율을 분석하여 Table 5에 나타내었다. 그러나 모든 실험에서 섬유여재 공극에 대하여 1 m의 수두에 비하여 0.75 m의 수두의 경우에서 TSS 제거 효율이 높은 것으로 나타났다. 이는 수두에 의한 물리적 힘과 섬유여재의 공극을 유지하는 저항력이 혼합되어 나타난 결과로 추정된다. 즉 1 m 수두는 누르는 힘이 더욱 세지만 섬유 필터가 공극을 유지하는 힘을 넘어서 수 있을 수 있음에 따라 TSS 제거율이 오히려 감소될 수 있다는 것으로 해석된다. 또한 0.5 m의 경우나 0.25 m의 경우에도 80% 이상의 제거율이 나타나는 것으로 보아 실제 설계상에서 수두차를 많이 둘 필요가 없다는 것을 시사하고 있다. 그러나 79 μm 섬유의 경우 0.25 m에서 50% 정도의 제거율을 나타내고 있는데 이는 추가의 실험을 통해 확인이 필요할 것으로 보인다.

Table 5의 분석결과 실험조건에 대부분은 높은 TSS 제거율이 나타났으며, 여과속도를 분석하였을 경우 공극의 크기가 62 μm보다 작은 여재는 여과속도가 작게 나타났다. 이러한 결과를 통해서 62 μm가 적절할 것으로 판단되어 수

Table 5. TSS removal efficiency using fiber filters

Mesh size	Water head	TSS removal efficiency (%)			
		1 m	0.75 m	0.5 m	0.25 m
94 μm		80.69	90.50	94.26	89.79
79 μm		81.38	95.72	77.45	50.94
62 μm		87.46	93.21	88.43	88.15
30 μm		96.27	98.77	95.37	99.48
20 μm		95.04	97.64	95.63	97.35

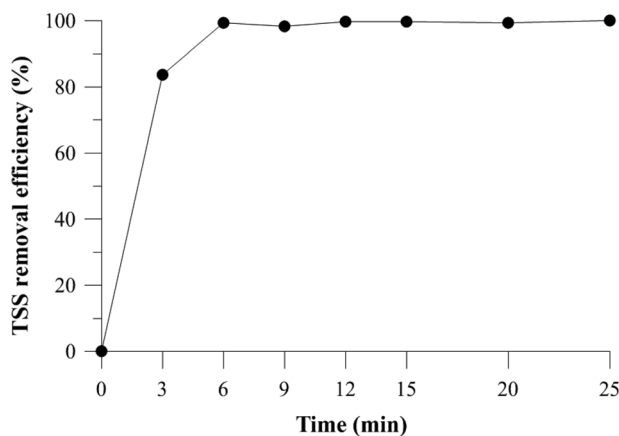


Fig. 8. Changes in TSS removal efficiency with time.

두 크기가 1 m일 경우 시간별 TSS 제거율 변화를 분석하였다. 실험 결과는 Fig. 8과 같으며, 실험 시작 6분 후에는 거의 99%에 가까운 제거 효율이 유지되었다. 이 결과를 Table 2의 결과와 비교하면, 입도 분포는 다양하게 나타났지만 대부분의 무게를 차지하는 부분은 입도가 큰 입자에 치중되어 있을 것으로 추정할 수 있다. 또한 실험 초기 필터 공극 크기보다 작은 오염물질은 여과되지 않지만, 필터 공극보다 큰 오염물질이 축적되면서 오염물질 사이로 물이 통과할 수 있는 공극이 점차 작아지고 이로 인해 미세한 입자까지 축적시켜 TSS 제거 효율이 높아지는 것도 또 하나의 요인으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 초기 우수에 포함되어 있는 TSS 등 오염물질을 효과적으로 제어하기 위해 경제적이고 효과적인 섬유 필터의 사용 가능성을 분석하여 보았다. 실제 설계에 사용할 있도록 공극별 수두별 여과 속도를 측정할 수 있는 실험 장치를 개발하여 제작하고 그에 따른 결과를 분석하였다. 섬유여재는 저렴하고 견고한 폴리에스터를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단하였으며, 여재 사용 시 유지되어야 하는 적정 수두와 공극의 크기를 분석하였다.

- 1) 대전시 유성구의 관평천에 유입되는 우수거 유출수를 1시간 단위로 채수하여 입도분석을 실시한 결과 100 μm 이하의 입자가 대부분이었으며 36 μm의 크기를 가진 입자가 가장 많이 발생하는 것으로 분석되었다.
- 2) 우수 유출수의 입도 분포 결과를 참조하여 모의 유출수를 조제하여 수두별 공극별 섬유 필터의 여과 속도 측정하는 데에 사용하였다. 실험에 사용한 섬유 폴리에스터의 공극 크기는 입도 분포를 고려하여 94 μm, 79 μm, 62 μm, 30 μm, 20 μm 그리고, 수두 크기는 1 m, 0.75 m, 0.5 m, 0.25 m를 사용하였다.
- 3) 실험 결과 여과 속도는 초기 5분 내에 급격하게 감소하는 경향을 나타내었으며 일정 수준으로 접근하는 것을 알 수 있었다. 안정상태의 여과 속도는 수두크기가 감소할수록 공극크기가 감소할수록 감소하였으나 TSS 제거 효율은 6분 이후에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.
- 4) 실험된 조건 중에서 여과속도에 대한 분석을 하였을 경우 여재에 가해지는 수두는 0.5 m 이상 유지되는 것이 바람직하다고 판단되었으며, 공극의 크기는 실험조건에 중간 정도인 62 μm가 적절할 것으로 판단되었다. 그러나 20~94 μm의 공극을 가진 섬유로도 80% 이상 TSS 제거가 이루어진 것으로 보아 대부분의 중량은 입경이 큰 입자에 치중되어 있다고 추정할 수 있었다. 그러나 수두의 크기가 다소 감소하거나 공극의 크기가 다소 증가하여도 TSS의 제거율에는 큰 차이가 없을 것으로 추정된다.

Acknowledgement

본 연구는 본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

References

- Han, Y. H. and Seo, D., "Application of LID Methods for Sustainable Management of Small Urban Stream Using SWMM," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(10), 691~697(2014).
- Seo, D. and Fang, T. H., "Application of Automatic Stormwater Monitoring System and SWMM Model for Estimation of Urban Pollutant Loading During Storm Events," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(6), 373~381(2012).
- Yin, Z., Lee, E. H., Koo, Y. M. and Seo, D., "Development of integrated management system of stormwater retention and treatment in waterside land for urban stream environment," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(2), 126~135(2015).
- Brusseau, M. L., McColl, C. M., Famisan, G. and Artiola, J. F., "Chemical contaminants," Chapter 10, Environmental and pollution science, 2nd Ed., I. L. Pepper, C. P. Gerba, and M. L. Brusseau, eds., Elsevier Inc., Burlington, MA, 132~143(2006).
- Liu, D., Sansalone, J. J. and Cartledge, F. K., "Comparison of sorptive filter media for treatment of metals in runoff," *J. Environ. Eng.*, **131**(8), 1178~1186(2005).
- Deletic, A. B. and Mahsimivic, C. T., "Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas," *J. Water Environ. Eng.*, **124**(9), 869~879(1998).
- Park, J., Yoo, Y., Park, Y., Yoon, H., Kim, J., Park, Y., Jeon, J. H. and Lim, K. J., "Analysis of runoff reduction with LID adoption using the SWMM," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **24**(8), 805~815(2008).
- John, J. S. and Steven, G. B., "Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water," *J. Environ. Eng.*, **123**(2), 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. Environ. Eng.*, **124**(2), 131~137(1998).
- Torben, L., Kirsten, B. and Margit, R. A., "First flush effects in an urban catchment area in aalborg," *Water Sci. Technol.*, **37**(1), 251~257(1998).
- Roh, S. D., Lee, D. K. and Chun, Y. K., "A study on the early-stage storm runoff treatment for the reduction of non-point pollution materials on the road," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **20**(5), 525~533(2004).
- Kim, L. H., "Determination of event mean concentrations and first flush criteria in urban runoff," *Environ. Eng. Res.*, **8**(4), 163~176(2003).
- Park, J., Yoo, Y., Park, Y., Yoon, H., Kim, J., Park, Y., Jeon, J. H. and Lim, K. J., "Analysis of runoff reduction with LID adoption using the SWMM," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **24**(8), 805~815(2008).
- Ministry of Environment (MEV), "secondary, joint ministries [Water Management Comprehensive Plan] of promoting enhanced for 4 Rivers nonpoint source management comprehensive plan," Research Reports(2012).
- Ministry of Environment (MEV), "Nonpoint Pollution control facilities installed, Operating conditions investigation report," Research Reports(2008).
- Southeast Michigan Council of Governments (SEMCOG), "Low impact development manual for Michigan: A design guide for implementors and reviewers," <<http://library.semco.org/InmagicGenie/DocumentFolder/LIDManualWeb.pdf>> (Jan. 10, 2010).
- Hsieh, C. and Davis, A. P., "Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff," *J. Environ. Eng.*, **131**(11), 1521~1531(2005).
- Cho, K. W., Song, K. G., Cho, J. W., Kim, T. G. and Ahn, K. H., "Removal of nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events," *Chemosphere*, **76**(5), 690~696(2009).
- Choi, J. Y., Maniquiz, M. C., Lee, S. Y., Kang, C. G., Lee, J. Y., Kang, H. M. and Kim, L. H., "Evaluation and Design of Infiltration and Filtration BMP Facility," *Korean Soc. Environ. Impact Assoc.*, **19**(5), 475~481(2010).
- Ahn, J., Lee, D., Han, S. and Choi, H., "An Experimental Study on Filtration Efficiency of Sand Filter Layers to TSS and COD in Non-point Source Pollutant," *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **34**(5), 1477~1488(2014).
- Song, Y. W. and Rhee, S. K., "An Experimental Evaluation of Clay Minerals to Remove Non-point Sources of Contaminants in the Urban Runoff," *Int. J. Highway Eng.*, **14**(1), 55~61(2012).
- Yoo, K. S. and Han, H. Y., "Removal Characteristics of Rainwater including Non-point Pollutants Using Pre-filter of Wasted-tire and Non-woven Fabric," *J. Korean Soc. Water Waste.*, **19**(5), 655~659(2005).
- Jung, Y. J., Min, K. S. and Nam, K. H., "Wastewater Treatment by Submerged Filtration Bio-reactor using a Mesh as a Filter media," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **16**(1), 121~131(2000).
- Franks, S. M., Allen, P. and Ahmet, H., "Geosynthetic Filters for Water Quality Improvement of Urban Storm Water Runoff," *Am. Soc. Civil Eng.*, **138**, 1018~1028(2012).
- Harpreet, S. K., Ana, D. and David, M., "Assessment of Impact of Filter Design Variables on Clogging in Stormwater Filters," *Water Resour. Manage.*, **28**, 1873~1885(2014).
- Krishna R. R., F.ASCE, Tao, X. and Sara, D., "Evaluation of Biochar as a Potential Filter Media for the Removal of Mixed Contaminants from Urban Storm Water Runoff," *J. Environ. Eng.*, **140**(12), 1943~7870(2014).
- Mahed, A. Z., Ramesh, P. R., Manon, N. L., Hugh, R. W. and Narinder, K. K., "Experiment investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips," *Hydro. Proc.*, **18**, 2029~2037(2004).

28. Johir, M. A. H., Lee, J. J., Vigneswaran, S., Kandasamy, J. and Shaw, K., "Treatment of Stormwater using Fibre Filter Media," *Water Air Soil Pollut: Focus*, **9**(5-6), 439~447(2009).
29. Horan, N. J. and Lowe, M. "Full-scale trials of recycled glass as tertiary filter medium for wastewater treatment," *Water Res.*, **41**(1) 253~259(2007).
30. Belinda, E. Hatt, Tim, D. F. and Ana, D., "Hydraulic and Pollutant Removal Performance of Fine Media Stormwater Filtration Systems," *Environ. Sci. Technol.*, **42**(7), 2535~2541 (2008).
31. K. Bratieres, T. D. Fletcher, A. Deletic and Y. Zinger, "Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study," *Water Res.*, **42**(12), 3930~3940(2008).
32. Belinda E. Hatt, Tim, D. F. and Ana, D., "Treatment performance of gravel filter media: Implications for design and application of stormwater infiltration systems," *Water Res.*, **41**(12), 2513~2524(2007).
33. Abdel, M. N. and Kamel, H., "Purification of Stormwater Using Sand Filter," *J. Water Resour. Protect.*, **5**(11), 1007~1012(2013).
34. Stephen, J. R., Lloyd, H. K. J. and Peter, C. B., "Clay removal in basaltic and limestone horizontal roughing filters," *Adv. Environ. Res.*, **7**(1), 231~237(2002).
35. Kim, H. J., "Media Characteristics of Early-stage Storm Run-off Treatment Facility for the Reduction of Non-point Source Pollutants on the Urban Area," doctoral dissertation, Dankook University(2005).
36. Kim, S. G., Yun. S. L., Kim, Y. I., Lee, Y. J., Kim, R. H. and Kim, J. H., "Drainage and Treatment Characteristics of Runoff by Media," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **20**(5), 500~505(2004).
37. Kang, S. W., Lee, J. Y. and Kim, S. K., "Development of the Engineered Filter Media for Reducing Pollutants in Urban Runoff," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **27**(4), 391~396(2011).
38. Korea Chemical Fibers Association (KCFA), "Polyester long fiber industry competitiveness research," Research Reports (2007).
39. Kim, S. C., Lee, K. U., Lee, E. U., Jang, S. H. and Jo, I. S., "Fiber Material," Seoul: Hyung Seul publisher(2001).
40. Kim, S. R., "Cladding Material," Seoul: Kyo Mun Sa publisher(2000).