

여재 특성에 따른 강우 유출수 내 오염물질 제거특성 평가

Evaluation of the Removal Characteristics of Pollutants in Storm Runoff Depending on the Media Properties

김태균^{*,**} · 조강우^{*} · 송경근^{*} · 윤민혁^{*,**} · 안규홍^{†,*} · 홍승관^{**}
 Tae-Gyun Kim^{*,**} · Kang-Woo Cho^{*} · Kyung-Guen Song^{*}
 Min-Hyuk Yoon^{*,**} · Kyu-Hong Ahn^{*,*} · Sung-Kwan Hong^{**}

^{*}한국과학기술연구원 환경기술연구단 · ^{**}고려대학교 건축 · 사회환경공학과
^{*}Center for Environmental Technology Research, Korea Institute of Science and Technology
^{**}Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

(2008년 10월 10일 접수, 2009년 6월 30일 채택)

ABSTRACT : The aims of this study were to evaluate the removal efficiency for various pollutants in urban storm runoff by a filtration device, and to determine design parameters depending on filter media properties. Appropriate selection of filter media will affect the size and life time of the filtration device. Sets of column tests were performed in order to evaluate the removal efficiency by perlite and a synthetic resin. An investigation of surface properties including CEC (cation exchange capacity) and zeta-potential suggested that the perlite had a superior adsorption capability for cationic pollutants. TCOD_{Cr} and turbidity were analyzed to investigate the removal characteristic of particulate pollutant. In both columns, the particles in the collected storm runoff was almost completely capture with a small EBCT (empty bed contact time) of 2.5 minutes. Complete clogging at the EBCT of 2.5 minutes occurred after 630 minutes in the perlite column and 810 minutes in the resin column. The removal efficiency of TCOD_{Cr} and turbidity at the EBCT of 2.5 minutes decreased to below 70% due to an wall effect. The removal efficiency for dissolved pollutant (SCOD_{Cr}) was negligible due to the insufficient contact time for adsorption. The removal of heavy metals (Cu, Zn, Pb) was mostly ascribed to the filtration of particles containing metals, since the relationship between CEC and the removal efficiency was not apparent. The result of this study would be valuable for the application of filtration device to control of urban storm runoff.

Key words : Storm runoff, Filtration, Perlite, Synthetic Resin, Clogging

요약 : 본 연구의 목적은 도시지역 강우유출수 내에 존재하는 다양한 오염물질에 대한 여과장치의 제거 효율을 평가하고 여재의 특성에 따른 설계인자를 도출하는데 있다. 비점오염물질 제거기술로서 여과 장치 내에 충전될 여재의 선정은 여과장치의 수명과 크기를 결정하는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 컬럼운전을 수행함으로써 펄라이트와 합성여재의 강우유출수 내에 존재하는 오염물질에 대한 제거능을 조사하였다. 각 여재의 양이온교환능력 (CEC) 및 제타전위 등 여재의 표면특성을 분석한 결과 펄라이트가 양이온계 오염물질의 흡착에 있어서는 더 우수한 것으로 나타났다. 또한 컬럼 운전 수행 결과 입자성 오염물질인 TCOD_{Cr}와 탁도는 초기 2.5분의 접촉시간만 가지고도 대부분의 제거가 가능한 것을 확인할 수 있었다. 한편 수리학적 특성에 있어 EBCT (empty bed contact time) 2.5분의 시점에서 살펴보았을 때 폐색이 발생한 시점은 펄라이트는 630분, 합성여재에서는 810분으로 동일 조건에서 합성여재의 운전 수명이 더 긴 것으로 나타났다. 용존성 오염물질인 SCOD_{Cr}에 대하여서는 두 여재 모두 뚜렷한 제거 특성이 보이지 않았으며 이 결과는 흡착에 필요한 접촉시간이 확보되지 못한 것으로 판단된다. 마지막으로 여재의 표면 특성인 양이온 교환능력과 중금속 제거효율 사이의 상관관계는 찾아볼 수 없어 대부분 입자에 포획된 상태로 제거됨을 알 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 도시지역 강우유출수 처리를 위한 여과장치 설계 및 적정 여재 선정에 있어 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주제어 : 강우유출수, 여과, 펄라이트, 합성여재, 폐색

1. 서론

비점오염물질은 인간의 다양한 토지이용 과정에서 발생하며, 주로 강우시 우수에 포함되어 하천 수계로 유입된다. 특히 도로, 교량 등 포장지역은 차량 운행에 기인하

는 중금속, 유류 등 미량 유해물질을 포함한 각종 비점오염물질의 축적이 높아 강우 시 고농도의 강우유출수가 발생한다.¹⁾ 특히 수계에 인접하여 건설될 경우 노면에 축적된 비점오염물질과 더불어 유류 등 유독물 운반차량의 전복 등의 수질오염사고에 의한 수계오염이 발생 가능한 지

† Corresponding author : E-mail : khahn@kist.re.kr Tel : 02-958-5832 Fax : 02-958-6854

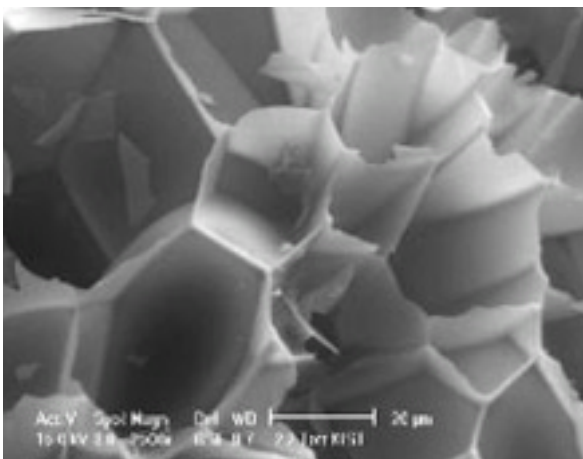
역이다.²⁾ 또한 포장지역은 불투수성 비율이 높아 강우 유출수의 유량과 수질의 변화가 빠르게 나타나며, 초기에 발생하는 유출수에 높은 비율의 오염부하가 집중되는 초기 세척현상이 나타나기도 한다.³⁾ 따라서 비점오염물질에 의한 수질오염을 저감하기 위해서 최근 비점오염물질 발생 지역에 초기강우 기준이 적용된 저감시설을 설치하도록 권고하고 있다.¹⁾

비점오염물질 제어기술의 하나인 여과 장치의 설계에 있어 적정 여재의 선정은 여과속도, 여과장치의 크기, 제거효율에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다. 조강우 등⁴⁾은 여과처리장치의 적용 가능성을 평가하고 도로 강우 유출수 처리에 적절한 여재를 선정하기 위하여 상용화된 네 종류의 여재에 대한 물리적·화학적 특성을 분석하였다. 그 결과 펄라이트는 활성탄, 안트라사이트, 제올라이트에 비해 경제성 면에서도 우수하였고 전반적으로 가장 우수한 흡착능을 보여주었다고 보고하였다.⁴⁾

한편 비점오염원 제어기술의 보급이 활성화된 미국에서는 환경 보호국(U.S. EPA)으로부터 비점오염물질에 대한 제거능과 경제성이 우수한 기술 및 다양한 여과재를 추천하고 있는데 그 중 고분자 합성여재는 탄화수소계 오염물질 및 박테리아에 대한 선택적 흡착능이 우수한 것으로 인정받고 있다.⁵⁾ 본 연구의 목적은 상기 두 여재에 대한 연속 컬럼실험을 통해 오염물질 제거 특성과 여재 폐색 주기를 비교평가하고 여과장치 설계를 위한 기본 자료를 제시하는 데에 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 여재 특성 분석



(a) Perlite

2.1.1. 물리적 특성분석

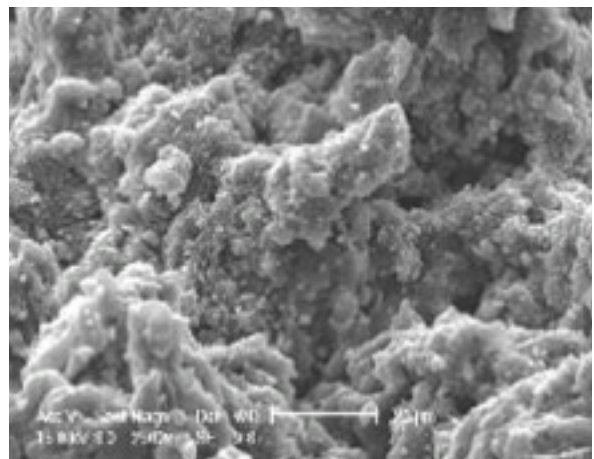
본 연구의 대상 여재는 펄라이트(Sunghyun, Korea)와 Polystyrene계열의 고분자 합성여재 (AbTech, USA)로 (Fig. 1) 두 여재의 물리적 특성을 알아보기 위하여 입경 분포, 공극률, 비중을 측정하였다. 입경 분포는 10단계의 표준체(6.35, 4.75, 2.0, 1.0, 0.85, 0.425, 0.3, 0.25, 0.18, 0.15 mm)를 이용한 체거름 실험을 통해 분석하였다. 각 여재의 공극률과 비중은 한국 암반공학회의 표준시험법⁶⁾에 준하여 수행하였다.

2.1.2. 화학적 특성분석

본 연구는 물리적 여과를 통한 오염물질의 제거가 주된 목적이었으나 일부 여재로의 흡착을 통한 오염물질의 제거 여부를 판단하기 위하여 두 여재의 흡착능력에 영향을 미칠 수 있는 제타전위 (Zeta-potential)와 양이온교환능력 (Cation Exchange Capacity, CEC)의 분석실험을 실시하였다. 우선 양이온 교환능력 측정은 암모늄 치환법을 이용하였는데 여재 1g을 증류수로 세척한 후 1M의 아세트산나트륨 용액을 이용하여 나트륨 이온으로 포화시켰다. 그 후 95%의 에탄올을 이용하여 여재에 흡착되지 않은 나트륨 이온을 세척하고 다시 1M의 아세트산암모늄으로 이온 교환시켜 용출된 나트륨 이온의 농도를 100배 희석 후 원자흡광광도계 (Z-8200, Hitachi, Japan)으로 분석하였다.⁷⁾ 한편 제타전위는 각 여재를 0.15 mm 표준체로 거른 후 증류수에 20mg/L의 농도로 주입하고, pH를 3, 7, 9로 조정된 상태에서 제타전위 측정기(ZETASIZER-3000HSA, Malvern, UK)로 측정하였다.

2.2. 컬럼 설치 및 운전

본 연구에서는 서울시 성북구에 위치한 내부순환로 월



(b) Synthetic resin

Fig. 1. SEM pictures of the filter media (Magnification: ×2500).

Table 1. Experimental condition in the lab-scale column tests

Parameter	Description
Media	Perlite, Synthetic resin
Column configurations	D 10.0 cm × L 33.5 cm
Sampling depth	Port 1. 6.5 cm, Port 2. 18.0 cm, Port 30.0 cm
Influent	Urban highway runoff (upflow)
Flow rate	200 mL/min (Line velocity: 2.54 cm/min)
Sampling interval	15min
Analysis	Turbidity, COD(Total, Dissolved), Heavy metal, Particle size distribution

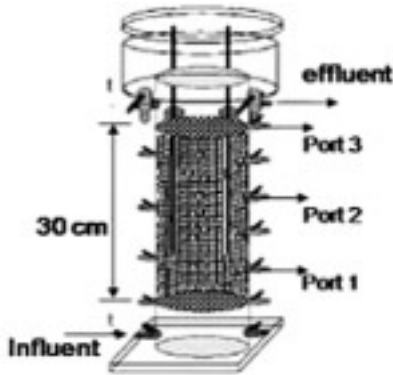


Fig. 2. Picture(a) and a schematic diagram (b) of the lab-scale column apparatus.

곡괘프 지점에서 채수한 도로 강우 유출수를 이용하여 연속 컬럼실험을 실시하였으며 실험 유입수는 SS (Suspended Solids) 농도를 기준으로 하여 조절한 후 이용하였다. Fig. 2와 Table 1은 실험장치의 모습과 실험 세부 사항을 각각 나타내고 있다.

본 연구에서는 여재 충전시 여재의 입경에 따른 영향을 최소화하기 위해서 두 여재의 입경 분포를 동일하게 맞추어 주었다. 컬럼 운전을 통해 강우 유출수 내 미세 입자에 의한 여재 폐색주기를 확인하기 위해서 EBCT (empty bed contact time)을 기준으로 2.5분, 7분, 12분이 되는 지점에서 수질, 압력 및 유량을 측정하였다. 채수 주기는

Table 2. Physical and chemical properties of the media being tested

	Porosity (%)	Specific gravity	Cation exchange capacity (meq/100 g)	Zeta potential (mV)		
				pH 3	pH 7	pH 9
Perlite	54.6	0.45	31.7	-20.3	-59.2	-65.6
Synthetic resin	52.0	0.26	23.1	-6.9	-26.8	-40.4

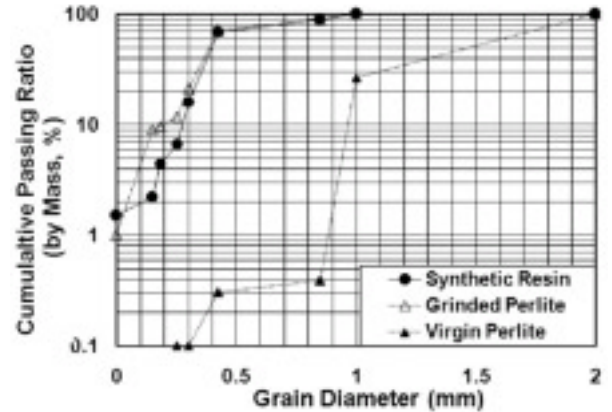


Fig. 3. Grain size distributions of the filter media.

15분으로 고정하고 운전시간 540분경과 후부터는 30분으로 증가시켰다. 분석 항목은 입자성 오염물질 제거 특성을 조사하기 위하여 TCOD_{Cr}, 탁도로 하였고 용존성 오염물질 제거 특성을 조사하기 위하여 SCOD_{Cr}를, 또한 중금속 제거 특성을 조사하기 위하여 납, 아연, 구리를 분석하였다. 대부분의 분석항목은 Standard Method에 준하여 분석하였고⁸⁾ 탁도는 Turbidometer (Hach, USA)를 사용하여 측정하였다. 분석 및 측정은 각각 3회씩 실시하여 평균값을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 여재의 물리적·화학적 특성

3.1.1. 물리적 특성

Fig. 3은 합성여재와 입경 조절 전후의 펄라이트 입경분포를 보여주고 있다. 여재의 입경 분포는 컬럼 내 수리 전도도를 결정하고 이는 다시 유입수의 장치 내 선속도 및 체류시간을 결정하기 때문에, 여재의 입경 분포를 적절하게 조절하는 것은 여과장치의 설계에 중요한 요소 중 하나이다. 만일 투수계수가 크다면 동일 수두에서 여과에 의한 처리 속도는 증가하고 입자들의 포획으로 인하여 발생하는 폐색(clogging)의 발생 시기는 늦어지겠지만 제거효율은 낮아질 것이다. 반대의 경우에는 제거효율은 상승하지만 폐색(clogging)이 더욱 빠르게 진행될 수 있다.⁹⁾ 일례로 일반적인 정수장 급속 여과사의 설계기준은 유효 입경

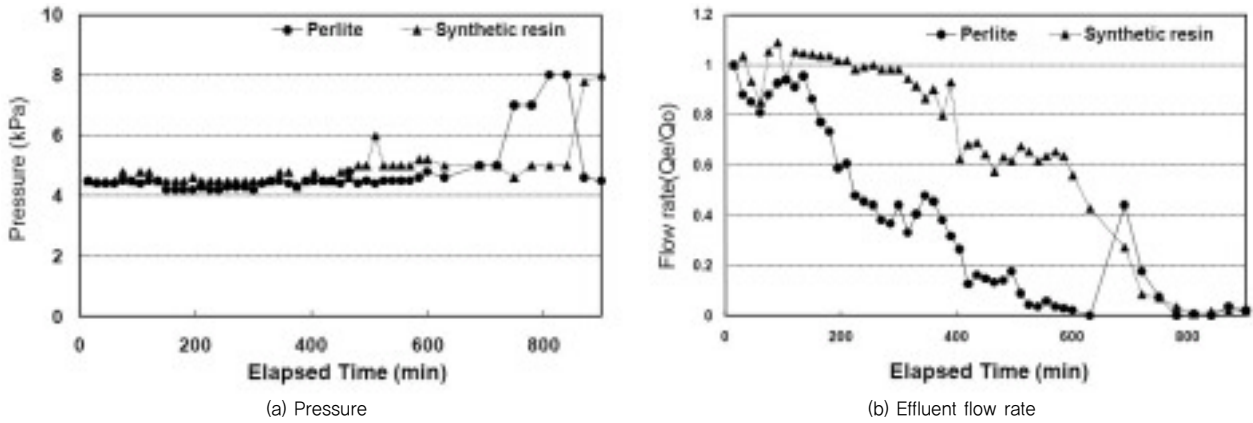


Fig. 4. Variations of pressure and effluent flow rate at EBCT 2.5min in the column experiments.

0.45~0.7 mm, 균등계수 1.7 이하를 권장하고 있는데, 0.3 mm 이하의 여과사는 막힘 현상을 빨리 유발하고 2 mm 이상의 여과사는 통상 여과층에서 여과 효과에 기여하지 못하는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁾ 본 연구에서 입경분포를 동일하게 한 후 컬럼에 충전된 여재는 유효입경이 0.28, 균등계수가 1.39로서 급속여과사에 비하여 균일하고 작은 입자들이 많이 분포하도록 하였는데 Sansalone 등의 연구³⁾에 의하면 강우 유출수 내에는 100 μm 이하의 미세 입자들이 다량으로 포함되어 있는 것으로 조사되었기 때문이다. 한편 Table 2에 나타난 바와 같이 여재 비중이 펄라이트가 0.45, 합성여재가 0.26으로 물보다 가벼워 운전 중 여재의 손실, 역세척 후 여재층의 불안정화 등이 발생할 수 있기 때문에 설계 시 이에 대한 고려가 필요하다.

3.1.2. 화학적 특성

강우유출수 내에 양이온 또는 콜로이드 상 물질의 흡착능과 연관이 있는 여재의 표면 특성을 파악하기 위해 여재의 CEC와 제타 전위를 측정된 결과는 Table 2와 같다. CEC는 펄라이트의 경우 31.7 meq/100 g의 값을 보여 문헌에 제시된 범위(25.9~33.3 meq/100 g)와 거의 일치하는 것을 확인하였다.¹¹⁾ 한편 합성여재의 경우 23.1 meq/100 g로 펄라이트보다 낮은 값을 보여주었지만, 일반적으로 강우유출수 처리에 사용되는 토양여과시설에서 사질토양(sandy loam)의 CEC (20 meq/100 g 이하) 보다는 높은 것으로 나타났다.¹²⁾ 따라서 본 여재에 사용된 두 여재 모두 강우유출수 내에 함유된 양이온계 오염물질의 흡착에 있어서 유리한 특성이 있음을 확인할 수 있었다.

한편 여재의 제타전위의 경우 모든 pH에 대하여 펄라이트가 더 높은 음의 전위를 갖는 것으로 측정되었으며 그 차이는 매질의 pH가 증가할수록 더 커졌다. 결과적으로 펄라이트의 CEC가 큰 값을 보이며 표면전위 역시 합성여재보다도 더 큰 음의 전하 값을 가지고 있는 것으로 보아

강우유출수 내의 양이온 또는 양의 전하를 띤 콜로이드 상 물질에 대하여 높은 흡착능을 가질 것으로 예상된다.

3.2. 수리학적 특성

비점오염원에 대한 관리가 활성화된 미국, 유럽 등에서는 강우 시 발생하는 도시 강우 유출수의 오염 부하량을 줄이고 하천 수질을 개선하기 위한 노력으로 여과 장치가 많이 쓰이고 있다.¹³⁾ 하지만 여과 장치의 설계 및 운전에서 가장 큰 고려사항은 여재 폐색으로 인해 장치의 여과 속도가 현저히 감소하는 것이다.^{14, 15)} 특히, 동력을 이용한 역세척이 곤란한 비점오염물질 여과장치의 경우에는 여재층 상부에서 발생하는 폐색으로 인해 여재층 전체의 활용이 불가능하게 될 가능성이 있어, 폐색주기는 여과 장치의 수명을 결정하는데 중요한 인자라고 할 수 있다.¹³⁾ 본 연구에서는 폐색 주기에 대한 수리학적인 조사를 위하여 몇 가지 EBCT에 해당하는 위치에서 압력과 유량의 변화를 조사하였다. Darcy의 법칙에 의하면 동일 유량 조건에서 막힘 현상에 의해 여재의 공극 사이가 막히게 되어 투수계수가 줄어들게 되면 압력이 증가하게 됨을 알 수 있다.

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{\Delta P}{L} \quad (1)$$

여기서, Q는 유출유량(m³/sec), ΔP는 압력차(Pa), k는 투수계수(m²), μ는 점성계수(Pa·sec), A는 여재 면적(m²), L은 여재 충전 깊이(m)를 의미한다.

Fig. 4는 실험과정동안 컬럼의 각 지점에서 압력과 유량의 변화를 보여주고 있다. 펄라이트와 합성여재의 여재 입경을 동일하게 조절하였기 때문에 두 여재 모두 초기에는 EBCT가 2.5분인 지점에서 압력이 약 4.5 kPa로 일정하였다. 하지만 여재 폐색이 진행됨에 따라 펄라이트가 750분, 합성여재가 870분 일 때 압력의 현저한 증가가 발생하였다. 또한 유량에 있어 EBCT 2.5분인 지점에서 펄라이트

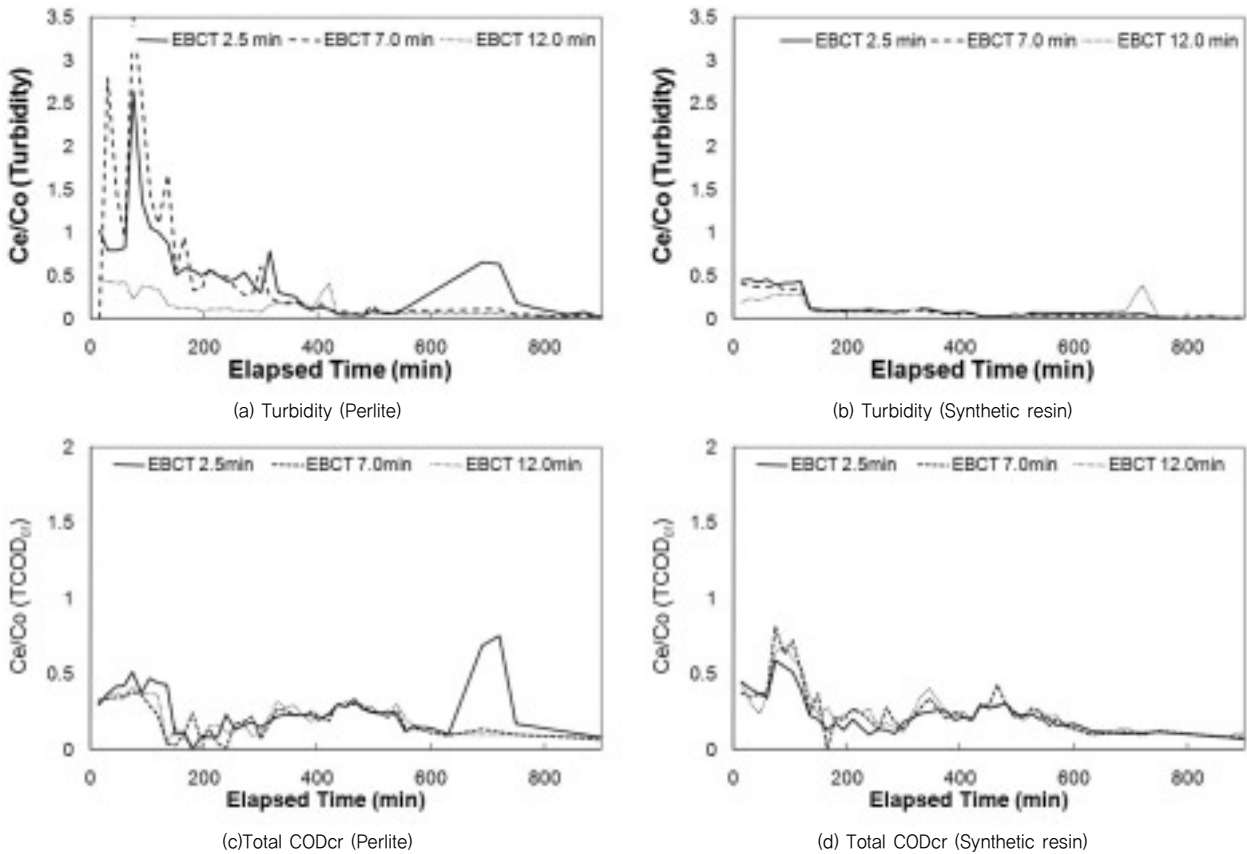


Fig. 5. Removal efficiency of turbidity and TCODcr in the column experiments.

트의 경우 630분, 합성여재는 810분에 유출량이 0에 가까워졌다. 유출량 감소는 지속적으로 서서히 일어난 반면 압력은 유출량이 0에 가까워진 후 급격히 증가하는 것으로 관측되었다. 한편, 상기 시점에서 유량의 감소가 여재층 전체 폐색에 기인한 것이 아닌 유출 밸브 주변 여재의 폐색에 의해 발생했을 가능성을 고려하여 실험 경과 720분에 유출 밸브 주변에 누적된 고형물을 제거해 주었다. 그 결과 급격히 압력이 저하되고 유출량이 증가하였으나 시간이 얼마 지나지 않아 EBCT 2.5분 지점에서 다시 압력의 증가와 유량의 감소가 나타나 상기 시점에 여재층 전체의 폐색이 발생하였다는 것을 확인하였다. 반면 EBCT 7.5분 지점의 경우는 EBCT 2.5분 지점과 달리 변화한 상태를 상당기간 유지하는 경향을 보여주어 이 지점까지의 여재층 폐색은 일어나지 않았음을 추측할 수 있었다. 결론적으로 펄라이트는 630분, 합성여재는 810분이 경과하였을 때 EBCT 2.5분의 지점까지 전 깊이에 대해 막힘 현상이 발생하여 여재의 한계 여과량이라고 할 수 있었다.

3.3. 도로 강우유출수 내 오염물질 제거 특성

3.3.1. 입자성 오염물질 제거특성

입자성 오염물질의 제거 특성을 대표하는 인자로서 Fig.

5에서는 탁도와 TCOD_{Cr}를 각각 제시하였다. 펄라이트를 충전한 컬럼에서는 탁도, TCOD_{Cr} 모두 초기에 유출수의 농도가 오히려 유입수의 농도보다 높은 것으로 관측되었다. 이는 펄라이트의 입경 조절 과정에서 발생한 미세입자들이 유출되면서 발생한 것으로 판단되며 실제 유출수의 탁도 및 TCOD_{Cr}의 결과가 과도하게 높은 경우에는 유출수 안에서 미세한 펄라이트 입자를 육안으로 확인이 가능하였다. 한편 합성여재의 경우 펄라이트보다 초기 미세입자의 유출이 발생되지 않는 안정화 상태를 좀 더 빨리 유지하였으며, 두 여재 안정화 후 탁도 제거효율과 TCOD_{Cr} 제거효율은 각각 67%~91%, 70%~92%로 유지되었다. 이 결과는 건설교통부(2007)에서 권고하는 필터방식의 장치형 처리효율인 COD 40~70%를 만족할 뿐만 아니라,³⁾ 기존의 유사 강우유출수 여과장치¹⁶⁾보다 우수한 처리 성능임을 확인할 수 있었다.

한편 안정화된 두 컬럼에서 EBCT가 가장 짧았던 EBCT 2.5분 지점의 제거효율이 EBCT가 더 길었던 EBCT 7분과 EBCT 10분의 지점에서 제거효율과 거의 비슷한 제거효율을 보여주었다. 즉, 초기 2.5분의 접촉시간만 가지고도 대부분의 고형물의 제거가 가능한 것으로 보인다. 그러나 EBCT 2.5분 지점에서 누적운전시간이 펄라이트는

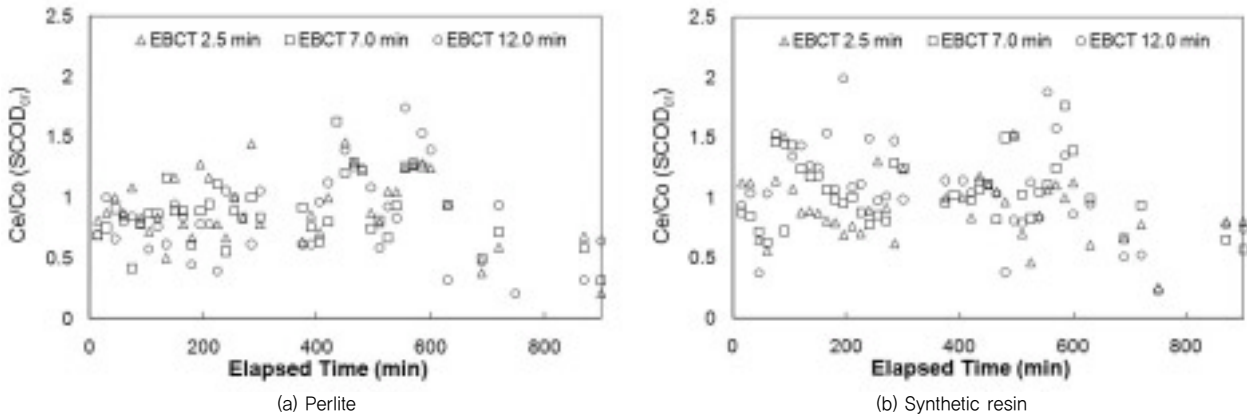


Fig. 6. Removal efficiency of SCOD_{Cr} in the column experiments.

690분일때 탁도, TCOD_{Cr} 제거효율의 급격한 하락이 관측되었다. 이러한 제거효율의 감소는 그 시점이 유출 유량이 0에 가까워진 시점과 거의 일치한다는 측면에서 파과점이라기 보다는 여재 폐색에 의해 유체의 흐름이 여재층과 컬럼 벽면 사이로 집중되어 일어나는 편류현상(channeling) 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6에서 제시한 용존성 오염물질의 제거경향도 흡착으로 인한 오염물질의 제거는 큰 의미를 갖지 않는다는 점에서 상기 해석을 뒷받침할 수 있다. 이 결과를 토대로 각 여재의 TCOD_{Cr} 제거 용량은 펄라이트가 단위 질량(g)당 121.5 mg, 합성여재가 501.8 mg 정도임을 알 수 있었다.

3.3.2. 용존성 오염물질 제거 특성

본 연구에서 컬럼 실험 시 오염 물질이 제거되는 방법은 주로 여재의 공극에 의한 여과 방법과 일부 입경크기가 0.45 μm 이하로 정의되고 있는 용존성 물질은 여재의 화학적 특성에 기인하는 흡착으로 제거될 것이라 예상하였다. 실험에 사용된 각 여재의 용존성 유기물에 대한 제거 효율을 조사하기 위하여 SCOD_{Cr}에 대한 분석을 실시하였으며 그 결과는 Fig. 6에서 보여주고 있다. 두 여재 모두 기대했던 것과 달리 뚜렷한 제거 특성이 보이지 않았으며 제거 효율 또한 평균 10% 내외로 매우 낮게 나타났다. 즉, 여재 내 이온교환 또는 전기적 인력을 통한 용존성 유기물의 흡착이 거의 발생하지 않았으며, 이는 여재층 내에서의 접촉시간이 흡착이 이루어지기에는 충분하지 않았기 때문인 것으로 추측된다. 실제로 오염물질의 종류에 따라 큰 차이가 있지만 일반적으로 흡착평형에 도달하기 위해서는 수 시간의 접촉 시간이 필요한 것으로 보고된 바 있다.¹⁷⁾ 따라서 본 연구의 컬럼실험의 경우에도 용존성 유기물이 제거되기에는 반응시간이 너무 짧았으며, 이에 따라 흡착 평형시점 및 파과점은 관측하지 못하였다.

3.3.3. 중금속 제거 특성

세 종류의 중금속(Pb, Zn, Cu)에 대한 제거 경향을 살펴보면 초반의 안정화 이후 약 80%의 제거효율을 유지하다가 후반에 증가하는 경향을 보였으며, 이는 탁도, TCOD_{Cr} 등의 제거 경향과 유사하였다. 따라서 강우유출수 내에 존재하는 중금속에 대한 제거는 주로 입자에 부착된 상태에서 여과에 의존하는 것이 대부분이라는 것을 추론할 수 있었다. 기존에 강우유출수 내 중금속의 분포에 대한 문헌들을 살펴보면 아연, 납 구리는 50 μm 이하의 실트 크기의 입자에서 가장 높은 농도로 나타나는 것으로 보고된 바 있

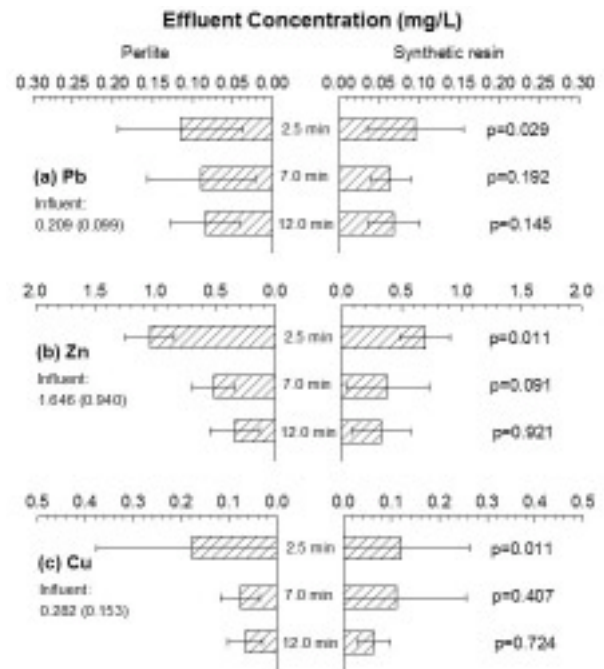


Fig. 7. Average effluent concentration of heavy metals (Pb, Zn, Cu) in the column experiments. Error bars show the standard deviations of the concentration, p represent p-value of paired t-test between perlite and synthetic resin.

Table 3. Physical and chemical properties of the media being tested

		TCOD _{Cr} (g)	SCOD _{Cr} (g)	Heavy Metals(mg)		
				Pb	Zn	Cu
Perlite	In	7.772	1.225	5.291	35.49	260.8
	Out	2.491	0.9706	2.650	19.48	2.914
	Remova	15.281	0.2544	2.641	16.01	257.886
Synthetic resin	In	29.01	5.025	21.41	144.4	595.2
	Out	6.052	4.596	9.215	42.20	7.037
	Removal	22.958	0.4290	12.20	102.2	588.2

다.^{3, 18)} Fig. 7에 정리한 세 종의 중금속에 대한 깊이별 유출수의 평균 농도를 살펴보면 EBCT 2.5분의 위치에서 대부분의 제거가 이루어졌던 SS, 탁도 등의 결과와는 달리 EBCT가 증가할수록 유출수 내 중금속 농도가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 여재의 공극에 포획되기 어려운 미세입자들에 중금속이 많은 비율로 포함되어 있다는 간접적인 증거이기도 하다.

Table 2에서와 같이 중금속의 제거에 있어서 여재의 특성이 미치는 독특한 영향을 찾아볼 수 있었는데 앞선 여재 특성 분석 결과를 통해 양이온계 용존성 중금속의 흡착에 있어 펄라이트가 더 유리할 것으로 기대하였다. 하지만 Fig. 7에 제시한 컬럼 깊이별 유출수의 평균 중금속 농도를 살펴보면 합성여재가 미세하게 높은 제거효율을 보여주었다. 즉, EBCT 7분과 12분에 해당하는 위치에서는 두 컬럼 유출수의 농도에 큰 차이가 없었지만 EBCT 2.5분에서는 통계적으로 유의한 차이가 관측되었고 이는 paired t-test를 통해 검증할 수 있었다. 그림에 제시한 p-value는 일반적으로 0.05이하일 때 두 평균 사이에 유의한 차이가 있는 것으로 간주한다. 강우 시 발생하는 강우유출수의 입자성 물질의 표면전위는 기존 문헌에서 그 범위가 -13 mV에서 -30 mV안에서 매우 다양한 값을 보여주었다.¹⁹⁾ 본 연구에 사용된 여재의 표면전위 값은 pH 7에서 펄라이트가 -59.2 mV, 합성여재가 -26.8 mV인 것으로 보아 미세 입자에 부착된 중금속의 제거는 여재의 양이온교환 능력보다는 여재 표면 전위에 기인하는 반발력에 더 영향을 받는 것으로 판단된다. 입자 및 여재의 표면 전위가 여과효율에 미치는 영향은 Leitschkis와 Rammensee²⁰⁾에서 일부 보고된 바 있다. 따라서 펄라이트 보다는 표면 전위가 더 낮은 음의 전위를 띠는 합성여재와의 반발력이 더 낮아 더 높은 중금속 제거가 일어난 것으로 추측된다. 하지만 Kim 등의 연구¹⁹⁾에서 연구된 지역의 강우유출수와 본 연구에서 대상으로 한 지역의 강우유출수는 표면전위의 특성이 다를 수 있기 때문에 정확한 원인분석을 위하여 차후 표면전위 분석도 요구된다.

3.3.4. 물질 수지 분석

앞서 제시한 컬럼별 유량 변화 및 오염물질 제거효율을 이용하여 EBCT 2.5분 지점을 기준으로 유입 및 유출 부하량에 대한 간단한 물질 수지를 산정하여 Table 3에 제시하였다. TCOD_{Cr}에 대한 부하 저감량은 합성여재가 펄라이트 보다 약 4배 이상 높았고 중금속의 경우에는 유입수에 포함된 중금속 농도에 따라 4~5배 이상 높게 나타났다. 앞서 각 오염물질에 대한 농도 제거율은 거의 유사하게 나타난 것을 고려해 보았을 때 상기 결과는 여재 내 수리학적 특성에 기인한 것으로 보인다. 즉, 두 여재를 유사한 입경으로 조절하였음에도 불구하고 합성여재 내 투수유량의 감소율이 더 작아 결과적으로 오염 부하 삭감량에 큰 차이를 보이게 된 것이다. 이는 비점오염 저감시설에 대해 일반적으로 투수성이 빠른 Sandy loam 또는 자갈을 사용하도록 권고하는 기존의 연구들과도 상응하는 측면을 갖는다.^{5, 12, 13)} 하지만 본 연구의 결과를 통해 유사한 입경 분포를 갖고 있더라도 입자 포획 특성, 여재 팽창 등 여재의 특성에 따라 오염부하 삭감량에 큰 차이가 있다는 점을 고려해 볼 때, 기존의 문헌^{1, 2, 5)}에서 여재의 유효입경 또는 균등계수 등에 대한 일률적인 권고 기준을 제시하는 것은 개선의 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 여과장치의 적용 가능성을 평가하고 설계인자를 도출하기 위하여 펄라이트와 합성여재에 대하여 강우유출수 내 오염물질 제거특성을 비교 실험 하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) EBCT 2.5분을 기준으로 유량이 0으로 줄어드는 시간이 펄라이트의 경우 630분이며, 합성여재의 경우는 810분이었던 점으로 볼 때 동일한 조건에서의 합성여재가 펄라이트에 비하여 운전 수명이 보다 길어 효과적이었다.
- 2) 탁도와 TCOD_{Cr}의 제거효율을 살펴보면 EBCT 2.5분 만으로도 대부분의 오염물질의 제거가 가능하였으며, TCOD_{Cr}의 제거효율이 급격히 감소하는 시점이 여재가 폐색된 시점과 거의 일치하는 것으로 볼 때 대부분의 오염물질의 제거는 여과를 통하여 이루어짐을 확인하였고, 오염물질 제거용량은 펄라이트에 비하여 합성여재가 우수하였다.
- 3) 용존성 오염물질의 지표인 SCOD_{Cr}에 대해서는 두 여재 모두 뚜렷한 제거 특성이 보이지 않았으며 제거 효율 또한 평균 10% 내외로 매우 낮게 나타나, 용존성 오염물질의 제거는 거의 이루어지지 않았다.

- 4) 안정화된 컬럼 내에서 중금속 제거효율은 평균 80% 이상이였다. 하지만 각 여재의 양이온교환능력으로 인한 기대 했던 중금속 제거는 확인할 수 없었고 대부분 입자에 부착된 중금속류가 제거되는 것으로 나타났다.
- 5) 두 여재가 유사한 입경 분포로 조절되었음에도 오염 부하 삭감량에 4~5배 이상 차이가 있는 것으로 나타나 적정 여재의 선택에 있어 여재 내 투수 특성은 주요한 고려사항으로 보인다.

KSEE

참고문헌

1. 환경부, 비점오염관리 업무편람, pp. 18~22(2007).
2. 건설교통부, "환경친화적 도로유지관리 잠정지침," (2007).
3. Sansalone, J. J. and Bushberger, S. G., "Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater," *Water Sci. Technol.*, **36**(8), 155~160(1997).
4. 조강우, 송경근, 안규홍, 김창균, 김태균, "도시지역의 초기강우 수질제어를 위한 여과-처리장치 개발," 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 2006 공동춘계학술발표회 논문집, 대구, pp. 134~140(2006).
5. US Environmental Protection Agency(EPA), <http://www.epa.gov/>(2008).
6. "암석의 공극률 및 밀도 측정 표준시험법", 터널과 지하공간, **16**(2), pp. 95~98(2006).
7. Chapman, H. D., In methods of soil analysis. Agronomy 9, madison, pp. 891~901(1965).
8. APHA, AWWA, WEF, Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th ed., Washington D. C., pp. 3~13(2005).
9. Bear, J., Dynamics of fluids in porous media, Dover Publications, Inc., New York(1972).
10. 한국상하수도협회, 상수도 시설 기준, pp. 362~365(2004).
11. Alkan, M., Demirbas, O. and Dogan, O., "Zeta potential of unexpanded and expanded perlite samples in various electrolyte media," *Micropor. Mesopor. Mat.*, **84**(1-3), 192~200(2005).
12. Hsieh, C. and Davis, A. P., "Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff," *J. Environ. Eng-ASCE*, **131**(11), 1521~1531(2005).
13. Siriwardene, N. R., Deletic, A. and Fletcher, T. D., "Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study," *Water Res.*, **41**, 1433~1440(2007).
14. Warnars, E., Larsen, A. V., Jacobsen, P. and Mikkelsen, P. S., "Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban areaduring 23/4 years of operation," *Water Sci. Technol.*, **39**(2), 217~224(1999).
15. Bouwer, H., "Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering," *Hydrogeol. J.*, **10**(1), 121~142(2002).
16. 노성덕, 이대근, 전양근, "도로상의 비점오염물질 저감을 위한 초기우수유출수 처리에 관한 연구," 한국물환경학회지, **20**(5), 525-533(2004).
17. Das, N. C. and Bandyopadhyay, M., "Removal of Copper (II) Using Vermiculite", *Water Environ. Res.*, **64**(7), 852~857(1992).
18. Tuccillo, M. E., "Size fractionation of metals in runoff from residential and highway storm sewers," *Sci. Total. Environ.*, **355**, 288~300(2006).
19. Kim, J. Y. and Sansalone, J. J., "Zeta potential of clay-size particles in urban rainfall-runoff during hydrologic transport," *J. Hydrol.*, **356**(1-2), 163~173(2008).
20. Leitschkis, I. and Rammensee, W., "Influence of zeta-potential on the filtration efficiency of aqueous suspension on precoat filters," *Colloids Surf., A*, **159**, 405~412(1999).