Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 27, No. 4, pp.391-396 (2011)

도시지역 불투수면의 오염물질 유출저감을 위한 여재 개발 및 처리 특성 평가

강성원 · 이재영* · 김석구†

한국건설기술연구원 수자원 · 환경연구본부 건설환경연구실
*서울시립대학교 환경공학과

Development of the Engineered Filter Media for Reducing Pollutants in Urban Runoff

Sung Won Kang • Jai Young Lee* • Seog Ku Kim†

Water Resource & Environment Research Department, Korea Institute of Construction
School of Environmental Engineering, University of Seoul
(Received 7 October 2009, Revised 13 May 2011, Accepted 13 May 2011)

Abstract

Recently it revealed that urban runoff was one of the major source that contaminates the river, lake and estuary because it contains toxic compounds such as heavy metals and Poly Aromatic Hydrocarbons (PAHs) as well as suspended solids, organic compounds and nutrients. The engineered polymetric media in this research were developed for reducing pollutants in urban runoff and would be used to be charged in the storm water treatment equipment. The engineered media that were composed of the polypropylene was foamed to have the buoyancy and then shattered by mechanical for the efficient filtration. In this study, Spherical Expanded Polypropylene Media (SEPM), Crushed Polypropylene Media (CPM), Large Crushed Expanded Polypropylene Media (LCEPM), Small Crushed Expanded Polypropylene Media (SCEPM) were made from polypropylene. Surface characteristics of the developed media were determined by scanning electron microscopy analyses. Also, removal efficiencies of SS, COD_{Cr} in the artificial road runoff and the bed headloss by media and particle pollutants captured by media were examined. Results on the surface characteristics of media indicated that SCEPM had the largest specific surface area, 0.80 m^2/g, the lowest specific gravity, 0.091, and the biggest porosity, 0.63, because of crushing the media at the process of manufacturing. And the SCEPM's removal efficiencies of TSS and COD_{Cr} in the artificial road runoff were 92.9% and 83.6%, respectively and the headloss of SCEPM was the least of them.

keywords : Buoyant media, Expanded polypropylene, Filtration, Impervious surface, Non-point source

1. 서 론

수계의 오염저감을 위해서 점오염원의 처리뿐만 아니라, 비점오염원의 처리도 중요하다는 연구결과가(이현동 등, 2001; Bris et al., 1999; Ichiki et al., 2008; Kari et al., 2008; Lee and Bang, 2000) 밝혀진 이후 도시지역 비점오염원 유출저감을 위해 다양한 연구들이 진행되고 있다. 도시지역에서 배출되는 비점오염물질들은 많은 부분이 입자상물질에 기반하고 있다는 사실(이준호 등, 2007; Andral et al., 1999; Furumai et al., 2002; Murakami et al., 2004)이 밝혀져서 유출수내의 입자 제거를 최우선순위에 두고 있다. 현재까지 진행된 도시 비점오염원처리법은 유체역학적인 기술을 응용하여 무동력으로 고액을 분리하는 기술의 개발에 상당한 연구가 진행되었다. 그러나 이런 방식을 통한 오염물질의 제거는 넓은 부지가 소요되고 용존성 오염물질의 처리에 한계가 존재하여 근래에 들어서는 오염물질의 제거효율을 증가시킬 수 있는 천연소재(Brown et al., 2000, 2001; Jang et al., 2005) 및 인공소재(Liu et al., 2001a, 2001b; Tanaka et al., 1995)를 이용한 연구가 진행되고 있다. 천연소재는 경제성 및 구입이 용이한 장점을 가지고 있어 과거에는 다양한 연구들이 수행되었으나, 근래에 들어서는 가공성이 우수한 고분자 소재를 개발하여 원하는 형태, 크기 및 표면성질을 갖는 여재를 제조하려는 노력이 진행되고 있다.

초기의 부양성 고분자 여재의 적용 및 연구분야는 급속모래여과방식의 대안으로 개발되었다. 급속모래여과방식은 일반적으로 24시간에 한 번씩 역세척이 필요하며 역세척 수량이 생산된 처리수의 약 5%내외가 소모된다. 또한, 마모된 모래 조각들이 후단 기계장치 고장의 주원인이 되는 문제점을 극복하고자 부양성 고분자 여재가 고안되어 이용되고 있다.

부양성 고분자 여재에 대한 최초의 연구는 Daniel and Garton (1969)의 연구로서 비중이 가벼운 파라핀을 펠릿화한 여재를 제조하여 적용한 결과, 24시간을 운전하여 80% 이상의 처리효율을 얻었다. Rice 등(1980)은 밀도가 385~

† To whom correspondence should be addressed.
sgkim@kict.re.kr

417 kg/m^{3}인 알루미늄 실리케이트 여재를 제조하여 선속도 5.5 m^3/m^2/h로 운전하여 48 NTU의 유입수를 1.5~2.0 NTU까지 처리한 결과를 발표하였다. 또한, Harber and Schmidt (1991)은 부양성 고분자에 대해 다양한 실험을 수행하여 폴리스티렌이 폴리프로필렌, 폴리에틸렌 보다 부양력이 좋기 때문에, 부양성 여재로서 더 적합하고, 1~2 mm 폴리스티렌 입자에 PAC를 코팅하여 제작한 여재를 실험한 결과, 입자크기가 1.6~2.5 mm인 큰 입자보다 0.9~1.3 mm인 작은 입자로 구성된 여재가 유기물 제거효율이 더 우수하다고 하였다. 또한, Liu 등(2001a)은 도로면 유출수 중의 중금속을 흡착제거할 목적으로 폴리프로필렌 비드에 망간산화물과 철산화물을 코팅하여 중금속의 흡착성능을 평가하기도 하였다. 그러나, 이러한 연구에서는 부양성 여재의 가공을 통한 개발보다는 고분자 물질을 단순 이용하는 차원에서 여재가 적용되었다. 특히, 여재의 부양성을 증진하기 위해서는 여재의 비중이 낮아야 되나, 대부분의 연구들이 고분자물질을 그대로 사용하였기 때문에 여재가 수중에서 부양하기 보다는 팽창하는 정도의 효과만을 얻을 수 있었다. 이에 반해 Visvanatham 등(1996)은 다양한 조건에서 부양성 고분자 여재를 적용하여 체계적인 연구결과를 발표하였다. 폴리스티렌을 1.54 mm 크기의 구형입자와 분쇄입자로 제조하고, 폴리프로필렌을 3.66 mm 구형입자와 2.57 mm 분쇄입자로 제조하여 반응조에 충전하여 실험을 수행하여 부양성 고분자 여재가 모래여재와 비교하여 처리효율이 우수하고 여재의 막힘현상이 적다고 하였다.

여과를 위해 사용되는 여재는 입자의 제거효율과 막힘현상(clogging)이라는 두 가지 측면이 고려되어야 한다. 특히, 본 연구와 같이 불투수면에서 발생하는 오염물질의 경우 그 발생 특성상 주로 강우에 의해 의존하므로 발생 예측이 매우 어렵다. 따라서 적절한 유지관리를 위해서는 무동력 및 무인력 장치의 적용이 매우 유리하고 본 연구에서 개발하는 여재도 그 목적에 맞는 여재가 개발되어야 한다. 제거효율이 우수하더라도 단시간 내에 막힘현상이 나타나면 여재를 교체해주어야 하는 상황이 발생하고, 막힘현상은 잘 나타나지 않으나 여재의 처리효율이 낮으면 현장적용에 문제가 발생할 것이다. 따라서, 본 연구의 목적은 고형물의 제거효율이 우수하고 막힘현상이 적은 여재를 개발하여 도시 비점오염원 처리에 적용하는 것이다.

2. 연구방법

2.1. 부양성 고분자 여재

도시 비점오염원 저감을 목적으로 하는 여재의 개발을 위해 발포 폴리프로필렌(expanded polypropylene: EPP)과 폴리프로필렌을 이용한 4종류의 부양성 고분자 여재를 제조하여 Table 1에 제시하였다. 구형 발포폴리프로필렌 여재(SEPM)는 H사에서 제조한 발포 폴리프로필렌 비드를 이용하였다. 발포 폴리프로필렌은 입자 내부에 독립기공을 갖고 있어 높은 부양성을 갖게 된다. 대분쇄 발포폴리프로필렌 여재(large crushed expanded polypropylene media: LCEPM)

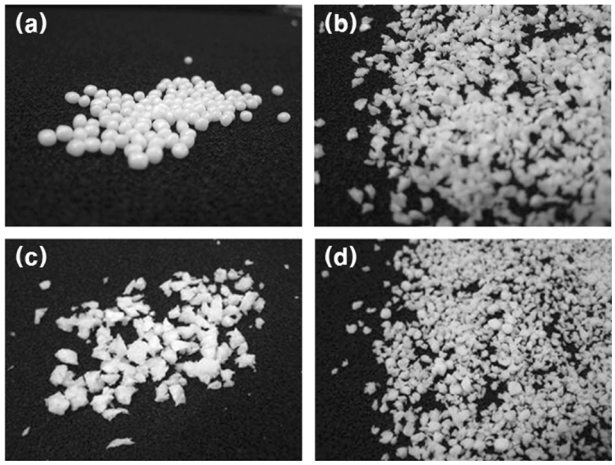

Fig. 1. Media apperances; (a) Spherical Expanded Polypropylene Media, (b) Crushed Polypropylene Media, (c) Large Crushed Expanded Polypropylene Media, (d) Small Crushed Expanded Polypropylene Media.

Table 1. Media descriptions

Media	Description
SEPM	Spherical Expanded Polypropylene Media
CPM	Crushed Polypropylene Media
LCEPM	Large Crushed Expanded Polypropylene Media
SCEPM	Small Crushed Expanded Polypropylene Media

와 미분쇄 발포폴리프로필렌 여재(small crushed expanded polypropylene media: SCEPM)는 SEPM을 금형에 채워 스팀성형을 통하여 판형물(板形物)로 성형한 후 분쇄하여 제조하였다. LCEPM은 분쇄시 일반 분쇄기(SH사, SH-50)를 이용 8~15 mm 크기로 분쇄하였고, SCEPM은 본 연구진에 의해 자체 개발된 미분쇄기를 이용하여 LCEPM을 1.5~3.0 mm 되게 분쇄하여 제조하였다. 한편, 여재 내부에 독립기공이 존재하지 않는 분쇄 폴리프로필렌 여재(CPM)는 부양성이 높은 SCEPM과 비교하기 위해 폴리프로필렌 덩어리를 1.5~3.0 mm로 분쇄하여 제조하였으며 Fig. 1에 각 여재별 외관을 나타내었다. 제조된 여재의 물리적 특성을 평가하기 위해 비표면적은 Micromeritics사의 Gemini 2390을 이용하여 BET법으로 측정하였고, 비중은 A&D사의 GF-600을 이용하여 측정하였다.

2.2. 오염물질 처리 성능 평가

도로노면 유출수내 오염물질에 대한 부양성 분쇄 여재의 처리성능을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 인공으로 제조된 유입수를 처리장치에 상향류형으로 유입시켜 여재의 고형물제거성능 평가를 실시하였다. 유입수는 진공청소기를 이용하여 도로면으로부터 먼지를 흡입하여 모은 후, 수집된 먼지에 대하여 200 μm 거름망을 이용하여 채거름하여 200 μm 이하되는 입자를 수돗물에 혼합하여 고농도의 도로노면 유출수를 제조한 후 상향류형 반응기에 유입하기 전에 수돗물과 혼합하여 오염물질의 TSS농도를 1,040~1,390 mg/L로 제조하여 사용하였다. 실험에 사용한 상향류형 여과 장치는

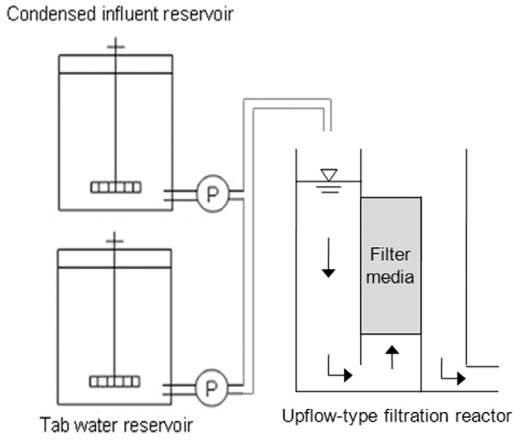

Fig. 2. Experimental setup.

현장에 적용할 수 있는 비점오염 저감장치를 축소한 Fig. 2와 같은 형태의 반응기로서 유입수가 반응기의 저류부(5 cm × 5 cm)로 유입된 후 상향류로 여재부(5 cm × 5 cm × 30 cm)를 자연유하로 통과하게 된다. 이때, 반응기의 운전조건은 17.5 m/hr의 선속도로 600분간 운전하며 시료를 채취하였다. 본 연구에서는 여재의 성능을 평가하기 위하여 유입수와 유출수 중의 대표적인 오염물질 항목인 TSS와 COD_{Cr} (closed reflux법)를 분석하였다. 유입수가 반응기를 통과하면 손실수두가 발생하는데 손실수두를 측정하기 위해 저류부의 수위 증가를 측정하였다. 또한, Malvern 사의 MS-2002를 이용하여 유입수와 유출수의 입도와 입자수를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 여재 표면 특성

표면 거칠기(surface roughness)는 여재의 여과효율을 결정하는 중요한 인자이고, 여재와 오염물질이 흡착반응에 의해서 제거될 경우 표면 거칠기는 흡착에 의한 오염물질 제거에 중요한 역할을 차지한다. Fig. 3는 각 여재의 표면을 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 확대 촬영한 사진이다. SEPM은 Fig. 3(a)에 나타난 것과 같이 표면이 매끄러운 것을 확인할 수 있다. SEPM은 제조과정에서 기공들이 여재의 내부에 독립적으로 존재하고 표면이 막혀있기 때문이다. CPM의 외형은 Fig. 3(b)와 같이 불규칙한 모습을 보이나 SEM을 이용하여 400배 확대 촬영한 사진에서 기공은 존재하지 않고 표면에 비교적 작은 주름들만 있었다(Fig. 3(b)). SCEPM은 Fig. 3(c)와 같이 표면에 다수의 기공이 존재하였다. 이것은 스팀성형에 의해서 결합된 발포폴리프로필렌 여재를 분쇄하는 과정에서 내부에 존재하는 미세한 다수의 독립기공들이 표면에 노출되어 나타난 것이다. Fig. 3(d)는 (c)를 확대한 것으로서 다른 여재보다 표면이 거친 것을 확인할 수 있다.

한편, Fig. 4는 SCEPM 제조시 분쇄과정에서 발생된 열에 의해 SCEPM의 표면이 녹는 현상에 의해 여재의 표면이 변형된 사진이다. 이로서, 발포폴리프로필렌의 분쇄시발생되는 열을 차단하는 것이 보다 넓은 표면적을 확보하는데 유리할 것으로 판단된다.

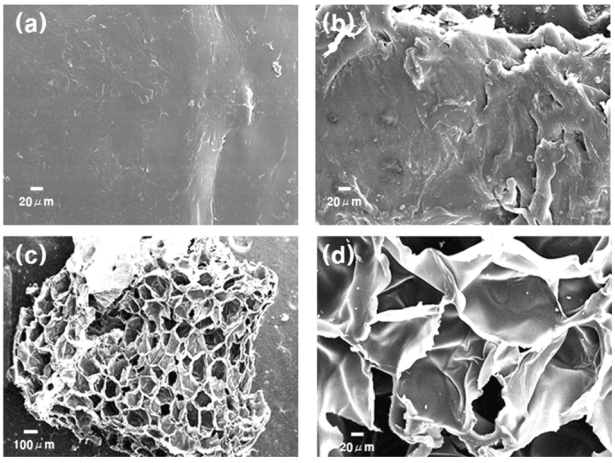

Fig. 3. SEM imagings of media surface; (a) Spherical Expanded Polypropylene Media (×400), (b) Crushed Polypropylene Media (×400), (c) Small Crushed Expanded Polypropylene Media (×75), (d) Small Crushed Expanded Polypropylene Media (×400).

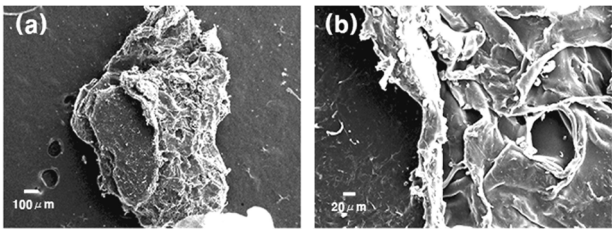

FIg. 4. SEM imagings of small crushed expanded polypropylene media by fine crusher without the cooling devices; (a) ×75, (b) ×400.

Table 2에 각 여재의 비표면적과 비중을 제시하였다. 공학적으로 가공되어 부양성과 분쇄된 형태를 갖고 있는 LCEPM, SCEPM은 SEPM과 CPM에 비하여 발포폴리프로필렌을 거칠게 분쇄함으로써 보다 넓은 비표면적을 나타내었다. SCEPM은 LCEPM에 비해 분쇄 입자의 크기가 작기 때문에 단위면적당 표면적을 나타내는 비표면적이 높게 나타났다. 한편, 분쇄과정에서 발생된 열에 의해 표면이 Fig. 5와 같이 변형된 SCEPM 여재는 0.33 m^2/g를 나타내어 표면의 기공이 잘 보존된 SCEPM (0.80 m^2/g)에 비해 50% 이하의 비표면적을 나타냈다. SEPM과 CPM(Fig. 3)과 같이 공학적으로 가공되지 않은 여재의 비표면적은 0.05 m^2/g 이하를 나타내었다. 한편, 부양성 분쇄 여재인 SCEPM과 LCEPM의 비중은 0.091에서 0.090을 나타내었는데 SEPM에 비하여 비중이 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 영향은 스팀성형시 표면이 녹으면서 비중이 증가한 것으로 판단된다. CPM은 폴리프로필렌의 일반적인 비중인 0.884와 거의 유사한 값이 나타나 CPM의 표면 및 내부에 공극이 존재하지 않음을 보여주고 있다.

3.2. 부양성 고분자 여재의 성능 평가

여재의 형태가 여과효율에 미치는 영향을 살펴보기 위해

Table 2. Specific surface area and specific gravity

Media	SSA* (m^2/g)	SSA, standard deviation	Specific gravity (ρ_s)	(ρ_s), standard deviation	Porosity (ε_o)	(ε_o) standard deviation
SEPM	<0.05	-	0.093	0.002	0.408	0.008
CPM	<0.05	-	0.884	0.008	0.602	0.008
LCEPM	0.07	0.07	0.090	0.003	0.617	0.010
SCEPM	0.80	0.15	0.091	0.005	0.630	0.005

* SSA : Specific Surface Area

Table 1에 제시한 4종류의 여재에 대하여 여과실험을 수행하였다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 SEPM은 다른 여재(CPM, LCEPM, SCEPM)와는 다르게 형태가 구형에 가깝고, 나머지 여재는 가공시 분쇄과정에 의하여 일정한 형태를 갖지 않는 난분쇄된 형태이다. 인공으로 제조된 도로노면 유출수를 상향류식 컬럼에 17.5 m/hr의 선속도로 유입하여 60분 경과 후 유입수와 유출수를 채취하여 비교한 결과, Fig. 5와 같이 구형형태를 갖는 SEPM의 처리효율이 60.5%로 가장 낮았으며, 높은 부양성을 갖는 미분쇄물인 SCEPM이 92.7%의 가장 높은 여과효율 나타내었다. 한편, SCEPM과 유사한 겉보기 형태를 갖으나 비중이 높은 CPM은 86.5%의 고형물 여과효율을 나타내었고 이는 LCEPM과 비교해서 여과효율이 10% 이상 높은 결과였다. 이러한 결과를 토대로 여과효율은 여재의 비중에 비하여 입자 크기 및 형상에 더 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 인공으로 제조된 유입수의 특성상 COD_{Cr}의 처리효율도 TSS 처리효율과 유사한 경향을 나타내었다.

평가 여재 중 여과효율이 가장 우수한 SCEPM에 대하여 유입수와 유출수의 입도분포 및 입자수를 관찰하여 입도별 제거현황을 평가하였다. Fig. 6에 나타난 것과 같이 유입수 중의 입자는 200 μm 이하를 나타내었고 입도가 작아짐에 따라 입자수는 크게 증가하는 것으로 나타났다. 고형물 입자의 크기(입도)와 입자수를 이용하여 입도별로 부피를 예측할 수 있으며, 60 μm에서 부피비가 가장 높게 관측되었다. 10 μm 이하의 입도를 갖는 입자는 입자수는 많으나 입자가 갖는 단일 부피가 작기 때문에 입도별 부피는 상대적으로 낮게 나타난다. 이에 반해 유출수의 입도분포는 25 μm를 넘어서면서 입자수가 확연히 줄어드는 것을 볼 수 있고,

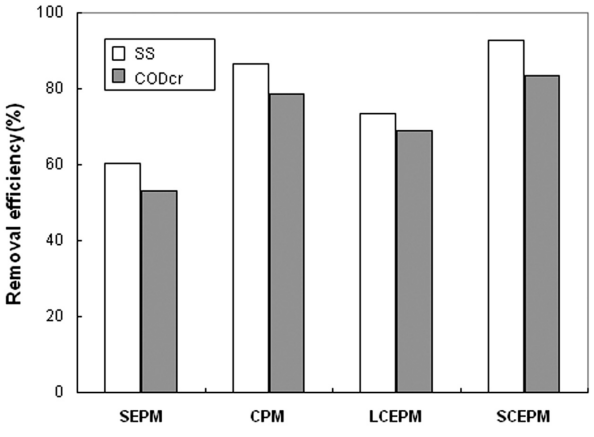

Fig. 5. Removal efficiencies of SS, and COD_{Cr}.

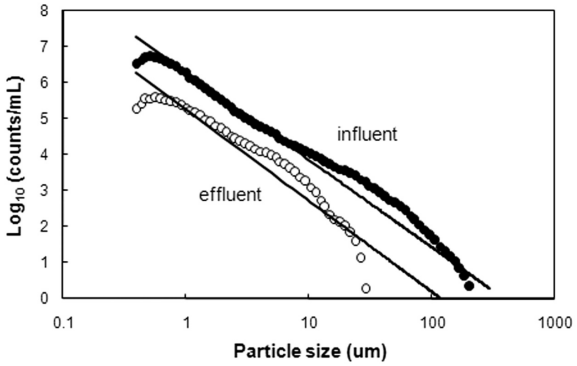

Fig. 6. Comparison of particle size distribution in influent and effluent using SCEPM.

30 μm를 초과하는 입자들에 대해서는 대부분 제거되는 것을 확인할 수 있다.

불투수면에서 발생되는 오염물질의 제거를 위해 개발된 SCEPM은 무동력으로 운전되는 시설에 적용될 예정이므로 고형물의 제거효율과 더불어 막힘현상에 의한 손실수두가 적어야 한다. 여재의 손실수두는 Kang 등(2007)의 연구와 같이 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\triangle H}{L}=\frac{180\mu V_o}{\rho_L g d_m^2}\frac{(1-\epsilon_0)^2}{\epsilon_0^3}+\frac{1.75\,V_0^2}{d_m^2 g}\frac{(1-\epsilon_0)}{\epsilon_0^3} \quad (1)$$

여기서, $\triangle H$는 손실수두(cm), L는 여재층 길이(m), μ는 액체의 점도(kg/m/s), V_o는 선속도(cm/s), ρ_L은 액체의 밀도(kg/m^3), d_m은 여재의 지름(mm), ϵ_o는 여재의 공극율이다. 식 (1)에서 보는 것과 같이 발생되는 손실수두는 여재의 공극율에 반비례하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 도시 비점오염원 처리에 적합한 여재로 부양성 분쇄 여재를 선택한 배경도 처리장치에 대한 관리의 특성상 유지보수를 최소화하기 위해서는 막힘현상이 적으면서 오염물질의 처리효율이 높아야 되기 때문이다. 따라서, Table 2에 제시한 것과 같이 평가대상 여재 중 공극율이 가장 큰 SCEPM의 손실수두가 가장 작을 것으로 판단되었다.

이에 SCEPM에 대하여 Fig. 2와 같은 상향류식 여과장치를 이용하여 본 연구에 적용된 SEPM, CPM, SCEPM에 대하여 손실수두를 측정하였다. LCEPM의 경우는 여재의 입자가 상대적으로 커서 본 실험의 비교 대상에서는 제외하였다. 실험결과 Fig. 8과 같이 실험초기에는 SEPM, CPM, SCEPM에 대하여 손실수두가 각각 61.2 mm, 57.4 mm, 60.7 mm를 나타내었다. 실험초기 CPM이 SCEPM에 비하여

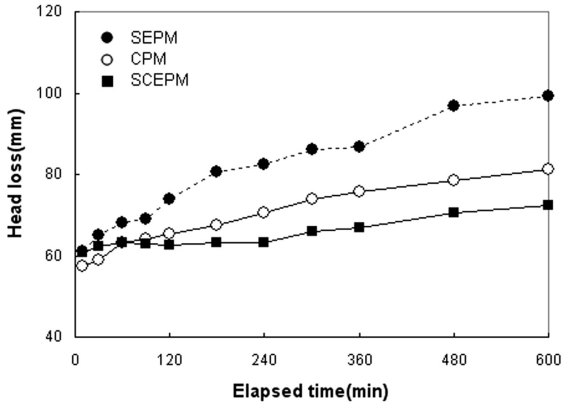

Fig. 7. Variation of headlosses in upflow-type filtration reactor using SEPM, CPM and SCEPM.

손실수두가 적게 나타난 것은 SCEPM의 경우 부력에 의해 여재층의 압밀이 발생하여 상대적으로 공극이 줄어들기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 SEPM을 충전한 경우는 손실수두가 급격하게 증가하여 운전 종료시점인 600분에는 100 mm에 근접하였고, CPM의 경우는 운전종류시점에는 81.1 mm, SCEPM은 72.5 mm를 나타내었다. SEPM의 손실수두가 CPM 및 SCEPM에 비하여 높게 나타난 원인은 여재의 형상에 기인한다. SEPM은 구형의 형상을 갖는 여재로서 난분쇄물(crushed)인 SCEPM 및 CPM에 비하여 공극율이 낮기 때문에 식 (1)에 의해 공극율이 작은 SEPM의 손실수두가 높게 나타난 것이다. SCEPM이 CPM에 비하여 손실수두가 낮게 나타난 원인에 대해서는 여재층 높이별로 단면에 포착된 오염물질량에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 강우시 도시지역 불투수면에서 유출되는 입자상 오염물질들을 효과적으로 여과할 수 있는 부양성 분쇄 여재를 개발하여 여재의 물리적 특성을 살펴보았다. 또한, 개발 여재를 이용하여 여과효율과 손실수두를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 부양성 분쇄 여재를 개발하기 위하여 폴리프로필렌을 가공한 CPM, 발포 폴리프로필렌을 가공한 SEPM, LCEPM, SCEPM을 제조하여 각 여재의 비표적과 비중을 측정한 결과 SCEPM이 0.80 m^2/g으로 가장 큰 비표면적을 나타내었다. SEPM, LCEPM, SCEPM의 비중은 유사하게 측정되어 가공에 의한 비중 변화는 미미하였다.
2) 각 여재별 여과효율을 측정한 결과 분쇄한 형태를 갖는 SCEPM, LCEPM, CPM이 구형 형태를 갖는 SEPM과 비교하여 여과효율이 평균 23.9%가 높은 것으로 나타났다. 또한, SCEPM의 여과효율이 92.7%를 나타내어 비교대상 여재 중 가장 높은 여과효율을 나타내었다.
3) 여재의 크기가 유사한 SEPM, SCEPM, CPM을 대상으로 여과시 발생되는 손실수두를 평가한 결과 분쇄 형태를 갖는 SCEPM과 CPM이 구형 형태를 갖는 SEPM과 비교하여 손실수두가 낮게 측정되었다. 이러한 결과는 손실수두가 여재의 공극율과 반비례 관계를 갖기 때문에 공극율이 높은 분쇄 형태가 손실수두가 낮게 측정된 것으로 판단된다.
4) 일반적으로 여과효율과 손실수두는 반비례 관계에 있으나, 부양성 분쇄 여재인 SCEPM은 다른 여재보다 여과효율이 높으면서 손실수두가 낮은 결과를 나타내어 상충되는 두 인자의 성능을 모두 향상시켰다. 이러한 결과를 토대로 SCEPM은 무동력으로 운전되는 비점오염저감 시설에 적용하기에 적합할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2011년 한국건설기술연구원의 주요사업 지원을 받아 수행된 것입니다. 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

이준호, 조용진, 방기웅(2007). 교량도로 배수받이 퇴적물질의 입경별 오염물질 함량. *수질보전 한국물환경학회지*, **29**(12), pp. 1360-1365.

이현동, 안재환, 김운지, 배철호(2001). 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **17**(2), pp. 147-156.

Andral, M. C., Roger, S., Montrejaud-Vignoles, M., and Herremans, L. (1999). Particle size distribution and hydrodynamic characteristics of solid matter carried by runoff from motorways. *Wat. Environ. Res.*, **71**, pp. 398-407.

Bris, F., Garnaud, S., Apperry, N., Gonzalez, A., Moushel, J., Chebbo, G., and Thevenot, D. R. (1999). A street deposit sampling method for method for metal and hydrocarbon contamination assessment. *Sci. Total Environ.*, **235**, pp. 211-220.

Brown, A. A., Brown, J. M., and Allen, S. J. (2001). The application of kudzu as a medium for the adsorption of heavy metals from dilute aqueous wastestreams. *Bioresource Tech.*, **78**, pp. 195-201.

Brown, P., Jefcoat, I. A., Parrish, D., Gill, S., and Graham, E. (2000). Evaluation of the adsorptive capacity of peanut hull pellets for heavy metals in solution. *Adv. Environ. Res.*, **4**, pp. 19-29.

Daniel, E. R. and Garton, J. E. (1969). An automated upflow filter for domestic water supplies. *Trans. ASAE*, **12**(4), pp. 556-558.

Furumai, H., Balmer, H., and Boller, M. (2002). Dynamic behaviour of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff. *Wat. Sci. Tech.*, **46**(11-12), pp. 413-418.

Harber, K. and Schmit, S. N. (1991). The Harberer process: combining contact flocculation, filtration & PAC adsorption. *J. AWWA*, **83**(9), pp. 82-89.

Ichiki, A., Ido, F., and Minami, T. (2008). Runoff charateristics of highway pollutants based on a long-term survey through a year. *Wat. Sci. Tech.*, **57**(11), pp. 1769-1776.

Jang, A., Seo, Y. W., and Bishop, P. (2005). The removal of heavy metals in urban runoff by sorption on mulch. *Environ.*

Pollut., **133**, pp. 117-127.

Kang, S. W., Lee, S. H., and Kim, S. K. (2007). A novel upflow-type filtration device using expanded polypropylene media (EPM) to treat first flush of rainwater: Effect of foaming ratio. *Particle Separation 2007*, text 48.

Kari, M., Gasperi, J., Moilleron, R., Gromaire, M. C., and Chebbo, G. (2008). Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in paris. *Wat. Res.*, **42**, pp. 539-549.

Lee, J. H. and Bang, K. W. (2000). Characterizing of urban stormwater runoff. *Wat. Res.*, **34**(6), pp. 1773-1780.

Liu, D., Teng, Z., Sansalone, J. J., Member ASCE, and Cartledge, F. K. (2001a). Surface characteristics of sorptive-filtration storm water media Ⅰ: Low-density (ρs<1.0) oxide-coated buoyant media. *J. Environ. Engin.*, **127**(10), pp. 868-878.

Liu, D., Teng, Z., Sansalone, J. J., Member ASCE, and Cartledge, F. K. (2001b). Surface characteristics of sorptive-filtration storm water media Ⅱ: Higher specific gravity (ρs>1.0) oxide-coated fixed media. *J. Environ. Engin.*, **127**(10), pp. 879-888.

Murakami, M., Nakajima, F., and Furumai, H. (2004). Modelling of runoff behaviour of particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from roads and roofs. *Wat. Res.*, **38**, pp. 4457-4483.

Rice, C. E., Magnuson, M. L., and Garton, J. E. (1980). Upflow water filtration unit, test results. *Trans. ASAE*, **23**(5), pp. 1143-1146.

Tanaka, Y., Miyajima, K., Funakosi, T., and Chida, S. (1995). Filtration of municipal sewage by ring shaped floating plastic net media. *Wat. Res.*, **29**(5), pp. 1387-1392.

Visvanathan, C., Werellagama, D. R. I. B., and Aim, R. B. (1996). Surface water pretreatment using floating media filter. *J. Environ. Eng.*, **122**(1), pp. 25-33.