Journal of Wetlands Research
Vol. 17, No. 3, August 2015, pp. 228-236

ISSN 1229-6031 (Print) / ISSN 2384-0056 (Online)
DOI http://dx.doi.org/10.17663/JWR.2015.17.3.228

비점오염 저감시설에 적용되는 여재의 흡착 및 탈착 능력 평가

문소연 · 홍정선 · 최지연 · 유기경* · 김이형†

공주대학교건설환경공학과
*한국도로공사도로교통연구원환경연구실

Evaluation on the adsorption and desorption capabilities of filter media applied to the nonpoint source pollutant management facilities

Soyeon Moon · Jungsun Hong · Jiyeon Choi · Gigyung Yu* · Lee Hyung Kim†

Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University
**Korea Expressway Corporation Research Institute*

(Received: 27 March 2015, Revised: 09 July 2015, Accepted: 09 July 2015)

요 약

도시화는 불투수면의 증가를 초래하여 자연적인 물순환 시스템의 왜곡, 비점오염물질 유출 증가, 하천의 수질악화 및 수생태계 훼손 등의 문제를 발생시킨다. 불투수면 증가로 인한 수리수문학적, 생태학적 및 환경적 영향을 저감하기 위하여 선진국에서는 저영향개발(Low Impact Development, LID)기법을 주요한 대안으로 적용하고 있다. 국내에서도 2012년에 비점오염원관리종합대책을 통하여 LID 기법을 비점오염 관리의 주요 방안으로 추진하고 있다. LID 시설은 물순환 구축을 통한 강우유출수의 유출저감과 함께 식물, 미생물, 여재에서의 다양한 물리화학적 및 생물학적 기작을 이용하여 오염물질을 제거하는 기술이다. 이러한 LID 시설에는 다양한 여재가 사용되고 있으나 여재의 오염물질 저감 능력 평가를 위한 흡착과 탈착 특성 등에 대한 종합적인 비교평가가 수행되지 못하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 LID 시설에 사용되는 다양한 여재 중에서 모래, 자갈, 바이오세라믹, 우드칩 및 바텀애쉬에 대하여 중금속(Pb, Cu)에 대한 흡착 및 탈착 특성 분석을 통해 여재의 환경성 평가를 수행하였다. 분석결과, 연구에 사용된 모든 여재에서 Pb에 대한 흡착 선호도가 Cu에 비하여 높게 나타났으며 흡착 kinetic 모델에서는 Pseudo second order equation의 적용성이 높게 평가되었고, 흡착등온식 모델에서는 Langmuir-3 isotherm이 높은 적용성을 보였다. 특히 여재 중에서 바이오세라믹과 우드칩의 경우 Pb에 대한 뛰어난 흡착능을 보이는 것으로 평가되었다. 여재의 탈착 실험 결과 모든 여재에서 환경부 유해물질 기준에 초과하지 않아 LID시설에 다양하게 적용 가능한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 비점오염원, 강우유출수, 여재, 중금속, 흡착 및 탈착

Abstract

Urbanization causes many environmental, hydrological and ecological problems such as distortion of the natural water circulation system, increase in nonpoint source pollutants in stormwater runoff, degradation of surface water quality, and damage to the ecosystem. Due to the increase in impervious surface by urbanization, developed countries apply low impact development (LID) techniques as important alternatives to reduce the impacts of urbanization. In Korea, LID techniques were employed since 2012 in order to manage nonpoint source pollutants. LID technology is a technique for removing pollutants using a variety of physical, chemical and biological mechanisms in plants, microorganisms and filter media with the reduced effluence of stormwater runoff by mimicking natural water circulation system. These LID facilities are used in a variety of filter media, but an assessment has not been carried out for the comprehensive comparison evaluation of adsorption and desorption characteristics for the pollutant removal capacity. Therefore, this study was conducted to analyze the adsorption and desorption characteristics of various filter media used in the LID facilities such as sand, gravel, bioceramic, wood chips and bottom ash etc. in reducing heavy metals(Pb, Cu). In this study, the adsorption affinity for Pb in all filter media was higher than Cu. Pseudo second order equation and Langmuir-3 isotherm are more applicable in the adsorption kinetic model and adsorption isotherm model, respectively. As a result of the desorption experiment, the filter media does not exceed KSLT which is the hazardous substance leaching limit, showing the capability of the filter media in LID. The bioceramic and woodchip as filter medias were evaluated and exhibited excellent adsorption capacity for Pb.

Key words : adsorption; desorption; filter media; heavy metals; nonpoint source management, stormwater runoff

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University
E-mail: leehyung@kongju.ac.kr

1. 서 론

경제발전과 생활수준의 향상으로 개발사업과 도시화는 지속적으로 불투수면을 증가시켰다. 과거 녹지였던 지역이 건물, 도로 및 주차장 등 불투수면으로 변화하면서 강우시 빗물의 지하 침투율과 표면조도계수가 감소되었다. 이로 인하여 강우시 발생하는 유출수 첨두유량이 증가하고 발생시간이 짧아졌으며, 자연적인 물순환 시스템이 왜곡되고 하천의 건천화, 도심지 홍수 등의 수문학적 문제가 발생하고 있다(Dow and Dewalle, 2000). 또한, 불투수면의 증가로 건기시 차량의 운행과 인간의 활동을 통해 지표에 축적된 다량의 입자상 물질, 중금속 및 각종 유해화학물질 등을 포함하는 비점오염물질이 함유된 강우유출수가 인근의 수계로 유출되어 수질오염, 부영양화 등의 환경적 문제를 발생시키고 있다(Kim and Kang, 2004). 비점오염물질의 유출은 하천의 자정작용에 영향을 끼치며 수생태계를 파괴하고 인간에게 물, 여가 및 휴식 공간 등을 제공하는 수질을 악화시켜 인간의 건강과 삶의 질에도 영향을 끼친다(Randall *et al.*, 1978; Helsel *et al.*, 1979; Hewitt and Rashed, 1992; Kim and Lee, 2005).

미국 및 유럽 등의 선진국에서는 2000년대 이후 도시화 및 개발사업 등으로 인한 물순환 왜곡과 비점오염물질 유출 저감을 위해 저영향개발(Low Impact Development, LID)이라는 새로운 도시개발방식을 제안하고 있다(Kim, 2008). 국내에서는 2004년 '비점오염원관리 종합대책('04~'20)'을 수립하였으며 이후 비점오염원에 대한 관리방향을 LID기법으로 전환하고 있다. 최근 들어 비점오염원 관리는 중앙정부에서 지자체 중심으로 추진되고 있으며 LID 기법을 적극 활용한 소규모 분산식의 강우유출수 관리가 이루어지고 있다(MOE, 2012).

LID기법은 자연이 가지고 있는 기본적인 기능, 즉 침투, 여과, 저류 및 증발산과 같은 수리학적 기능을 이용하여 강우시 발생되는 강우유출수를 효과적으로 순환 및 이용 가능하도록 하는 처리기법이다(Kang *et al.*, 2011). LID기법이 적용되는 여재는 여과 및 흡착 등의 물리, 화학적 반응을 통한 오염물질 저감 기능과 침투 및 저류 용량을 결정하는 기능을 가진다. 또한 여재의 크기 및 입도분포와 같은 물리적 특성은 LID 시설의 운영 능력과 시설의 유지관리 측면에도 중요한 요인으로 작용된다.

최근 들어, 오염물질저감과 유지관리 측면에서의 경제성을 바탕으로 LID 시설에 적용 가능한 여재에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 다양한 여재의 물리적인 특성과 오염물질 저감 능력에 대한 흡착 특성, LID 시설 내부에서 유해물질을 발생시키지는 않는지에 대한 여재의 탈착 특성을 통한 안전성 여부 및 경제성 등에 대한 종합적인 연구는 부족한 실정이다. 이에, 본 연구에서는 LID 시설에 사용되는 여재의 흡착 특성분석을 통하여 비점오염물질 저감에 효과적인 여재를 평가하였다. 또한 pH 환경에 따른 여재의 탈착 특성 분석을 통하여 여재의 안전성 및 경제성 평가를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 실험 대상 여재의 제원

LID 시설에 사용되는 여재의 크기와 입도분포는 여과효과에 영향을 미치는 중요한 설계인자로서 각 여재의 물리적 특성을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 본 연구에는 모래(Sand, SD), 자갈(Gravel, GL), 황토세라믹(Bio Ceramic, BC), 우드칩(Wood Chip, WC) 및 바텀애쉬(Bottom Ash, BA)를 사용하였으며, SD의 경우 0.3~2.4 mm, GL의 경우 4.8~13.2 mm의 직경을 가지는 것으로 나타났다. SD와 GL은 구입이 용이한 여재로서 여과시설에 널리 사용되고 있다. BC의 경우 제올라이트, 황토 등의 미세분말을 사용하여 제조된 여재로 직경은 2.0~4.7 mm의 범위를 가지며, 작은 원기둥모양이다. WC의 직경은 4.8~13.2 mm의 범위로 나타났으며, 임목폐기물로 친환경적 여재로서 중금속에 대한 흡착능력이 우수한 특징이 있다(Jeon and Kim, 2007). BA는 석탄의 연소 후 발생하는 산업폐기물로서 사용된 BA의 직경은 0.1~4.7 mm로 범위를 가지는 것으로 나타났다.

Table 1. Characteristics of filter media

Parameters	Unit	Sand	Gravel	Bioceramic	Wood Chip	Bottom Ash
-	-					
Code	-	SD	GL	BC	WC	BA
Media range	mm	0.3~2.4	4.8~13.2	2.0~4.7	4.8~13.2	0.1~4.7
D10		0.9	-	-	-	0.3
Cu		1.3	-	-	-	4.4
Price	(₩/kg)	98	88	10,000	15	-

Table 2. Characteristics of Adsorption and Leaching Batch Test

Parameters	Solution concentration	Solution Volume	Media Weight	Mixing Velocity	Mixing Temperature	Testing Time
Unit	-	mL	g	rpm	℃	hr
Adsorption	5ppm	100	10	185	20	1, 3, 6, 12, 18, 24
Leaching	pH 2.7-2.8					6
	pH 5.8-6.0					
	pH 6.8-7.5					

2.2 흡착 및 탈착 실험방법

도시지역에서 발생하는 비점오염물질 중에서 중금속의 경우 미량으로도 수계에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 선정된 여재의 중금속에 대한 흡착 및 탈착 특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 흡착 실험에 사용된 여재의 전처리는 Lee *et al*(2008) 및 Na *et al*(2011) 등 문헌조사를 통하여 수행되었으며 각 여재들은 증류수로 5회 이상 세척 후 105℃ 건조기에서 6 시간 동안 건조하여 사용되었다. 흡착 및 탈착 실험 조건은 Table 2에 정리하여 나타내었다. 흡착 실험에 사용된 중금속 용액은 표준용액을 5 ppm으로 희석 후 사용하였으며, 항온수평진탕기를 이용하여 20℃에서 1, 3, 6, 12, 18 및 24 시간 동안 진탕하였다. 탈착 실험은 폐기물 공정시험법의 Korea Standard Leaching Test(KSLT)에 따라 진행되었으며, 흡착 실험이 완료된 여재를 사용하여 흡착 후 오염물질 탈착에 대하여 분석하였다(MOE, 2011). 탈착 실험은 6시간 동안 진탕하였으며, 흡착 및 탈착 실험의 추출용액은 0.45 ㎛ 여과지로 여과한 후 ICP-AES (ICPS-7510)를 이용하여 중금속(Pb, Cu)에 대하여 분석하였다.

2.3 흡착 Kinetic models

흡착 Kinetic model은 흡착실험 결과를 이용하여 평형 흡착능과 흡착속도 상수를 도출할 수 있으며 기존 연구에 의해서 Pseudo first order, Pseudo second order, Simple Elovich, Power function 및 Parabolic diffusion 등 다양한 흡착 Kinetic model이 제시되어 있다. 본 연구에서는 선행 연구된 다양한 Kinetic model 중 많이 사용되고 있는 Pseudo first order, Pseudo second order 및 Elovich equation의 3가지 Kinetic model을 선택하였다. Pseudo first order equation은 식(1)에 나타내었으며 여기서 K (min^{-1})는 속도상수이며, q_t (mg/g)는 t (min)시간동안의 흡착량, q_e (mg/g)는 평형상태에서의 흡착량을 의미한다. Pseudo second order equation는 식 (2)와 같으며 모델의 흡착 거동은 Langmuir model을 따른다고 가정한다(Lee *et al*., 2008). 여기서 K_S (g/mg·min)는 이차 흡착에 대한 속도 상수를 의미한다.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_t \tag{1}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_s q_e^2} + \frac{t}{q_e} \tag{2}$$

마지막으로 Elovich equation은 다음 식 (3)과 같다. Elovich equation은 여재 표면과 이온간의 결합인 화학적인 흡착에 대한 반응식으로서, 시간에 따라 흡착 가능한 여재 표면이 줄어들수록 흡착 반응 속도도 느려진다는 이론을 바탕으로 한다(Juang and Chen, 1997). 여기서 q_t (mg/g)는 앞서 두 식 (1), (2)와 마찬가지로 시간 t에서의 흡착량을 의미하며, α와 β는 $q_t = F(t)$ 함수의 선형회귀분석을 통해 얻을 수 있는 Elovich 상수를 나타낸다(Gorme, 2011).

$$q_t = \frac{1}{\beta} ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} lnt \tag{3}$$

2.4 Langmuir isotherm

Langmuir isotherm은 단분자층의 두께로 흡착 결합력 작용을 판단하고, 단분자층 이상 분리된 층에서는 흡착이 일어나지 않는다는 가정을 이론화하여 모델로 나타낸 것이다. 즉, Langmuir 흡착은 단분자층 흡착으로 불리며 다음 식 (4) 부터 식 (6)과 같은 직선식 형태로 제안된다. 흡착 Kinetic model에 흡착실험 결과를 적용하여 Pb와 Cu의 여재표면에 대한 흡착이 Langmuir model에 기반을 두는 화학흡착 반응인 것으로 분석되어 본 연구의 흡착결과를 Langmuir isotherm에 적용하여 q_m (mg/g) 값을 산정하였다. 본 연구의 흡착실험 결과를 Langmuir isotherm에 적용했을 때 직선으로 도식화된다면 이 흡착실험에서 일어난 흡착은 Langmuir isotherm을 따른다고 판단할 수 있으며, 이 직선식의 기울기 또는 절편으로부터 구한 q_m (mg/g)값은 Langmuir 흡착량으로 사용되며 이는 여재의 이론적인 최대 단분자층 흡착능을 나타낸다(Na *et al*., 2011). 식 (4)의 경우 Langmuir-1, 식 (5)의 경우 Langmuir-2로, 식 (6)의 경우 Langmuir-3으로 표기하였다.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{bq_m}\frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m} \tag{4}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{q_m b} \tag{5}$$

$$q_e = -\frac{1}{b}\frac{q_e}{C_e} + q_m \quad (6)$$

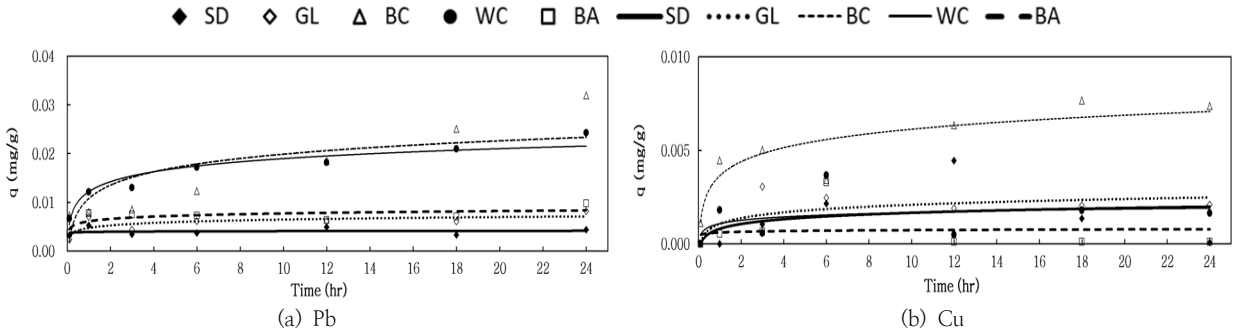
3. 연구결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 등온흡착 결과

Fig 1은 시간에 따른 여재의 중금속 흡착량 q (mg/g)을 나타낸 것이다. 흡착 실험을 수행한 결과, 흡착 반응이 안정화된 후에 SD, GL, BC, WC 및 BA 5가지 여재 모두에서 같은 시간동안 Cu 흡착량에 비하여 Pb가 더 많이 흡착된 것으로 분석되었다. Kang *et al*(2006)의 연구결과에 따르면, WC는 혼합된 중금속 용액 내에서 Pb의 흡착량이 가장 높았으며, 이는 혼합된 중금속 중에서 Pb에 대한 흡착선호도가 크기 때문인 것으로 조사되었다. 따라서, 본 연구의 흡착실험 결과도 SD, GL, BC, WC 및 BA 5가지 여재에 대하여 Pb에 대한 흡착 선호도가 Cu에 비하여 높은 것으로 분석되었다. Pb의 경우 BC,WC≫BA〉GL〉SD 순으로 흡착량이 높았으며, Cu의 경우 BC≫GL〉SD,WC〉BA 순으로 나타났다. 또한, 흡착반응은 초기 약 1시간 까지 빠르게 진행되었으며, 약 2시간 이후부터 안정된 반응을 보였다. 흡착시간이 길어질수록 흡착량이 증가하다가 안정되는 로그곡선 형태를 보였으며 이는 Giles *et al*(1960)이 제시한 흡착평형등온선의 분류에 의하여 L형에 속하는 것으로 조사되었다. L형 흡착등온선은 일반적으로 흡착제(여재)의 흡착사이트에 대해 용매와 흡착질(중금속)간의 경쟁이 강하지 않고 흡착질이 흡착제의 표면에 단층으로 흡착하는 경우를 나타낸다(Na *et al*., 2011). 본 연구의 경우 Pb와 Cu는 여재 표면에 단층으로 흡착되는 것으로 분석되었다.

3.1.1 Kinetic models 적용을 통한 이론적 최대 흡착능 평가

등온 흡착실험 결과를 토대로 Pseudo first order, Pseudo second order 및 Elovich equation 등 3가지 Kinetic model에 적용한 결과를 Fig 2에 나타내었다. Fig 2에서 도시된 결과를 통해 Pseudo first order와 Elovich Kinetic model에 비해 Pseudo second order가 정확하게 직선으로 도식화되는 것으로 나타났다. Pseudo second order model 적용 결과는 Table 3과 같으며, Pseudo second order model에 등온흡착 결과를 적용했을 때 Pb의 경우 0.8이상의 비교적 높은 R^2 값을 보여주었다(R^2〉0.9). 또한 다른 두 Kinetic model에 비해 양호한 직선관계를 이루어 Pseudo second order를 따르는 것으로 분석되었다. 이 모델은 Langmuir 흡착모델에 기반을 두기 때문에 Pb의 여재 표면에 대한 흡착은 물리흡착보다는 화학흡착에 가까운 것으로 조사되었다(Lee *et al*., 2008). Cu의 경우 BC에서는 0.8이상의 상관계수를 보였으나 SD, GL, WC 및 BA의 경우 0.2 이하의 비교적 낮은 상관관계를 나타내었으며, 이는 등온흡착량 실험을 통해 얻은 여재의 중금속 흡착 선호도의 영향으로 인해 같은 흡착시간 동안 Pb와 선택적으로 흡착이 이루어지면서 Cu의 흡착량이 상대적으로 낮기 때문일 것으로 판단된다. Pseudo second order model을 통해 각 여재별로 Pb와 Cu에 대한 q_m (mg/g) 값을 산정한 결과, Pb의 경우 q_m (mg/g) 값은 SD에서 0.2406으로 작았으며 BC에서 2.0803으로 큰 값을 가지는 것으로 분석되었으나 실제 흡착 실험 결과보다는 높게 산정되었다. Cu의 경우 BC의 q_m (mg/g) 값이 0.5232로 산정되었으며 Pb의 산정결과와 같이 실제 흡착 실험 결과보다 높게 산정되었다.

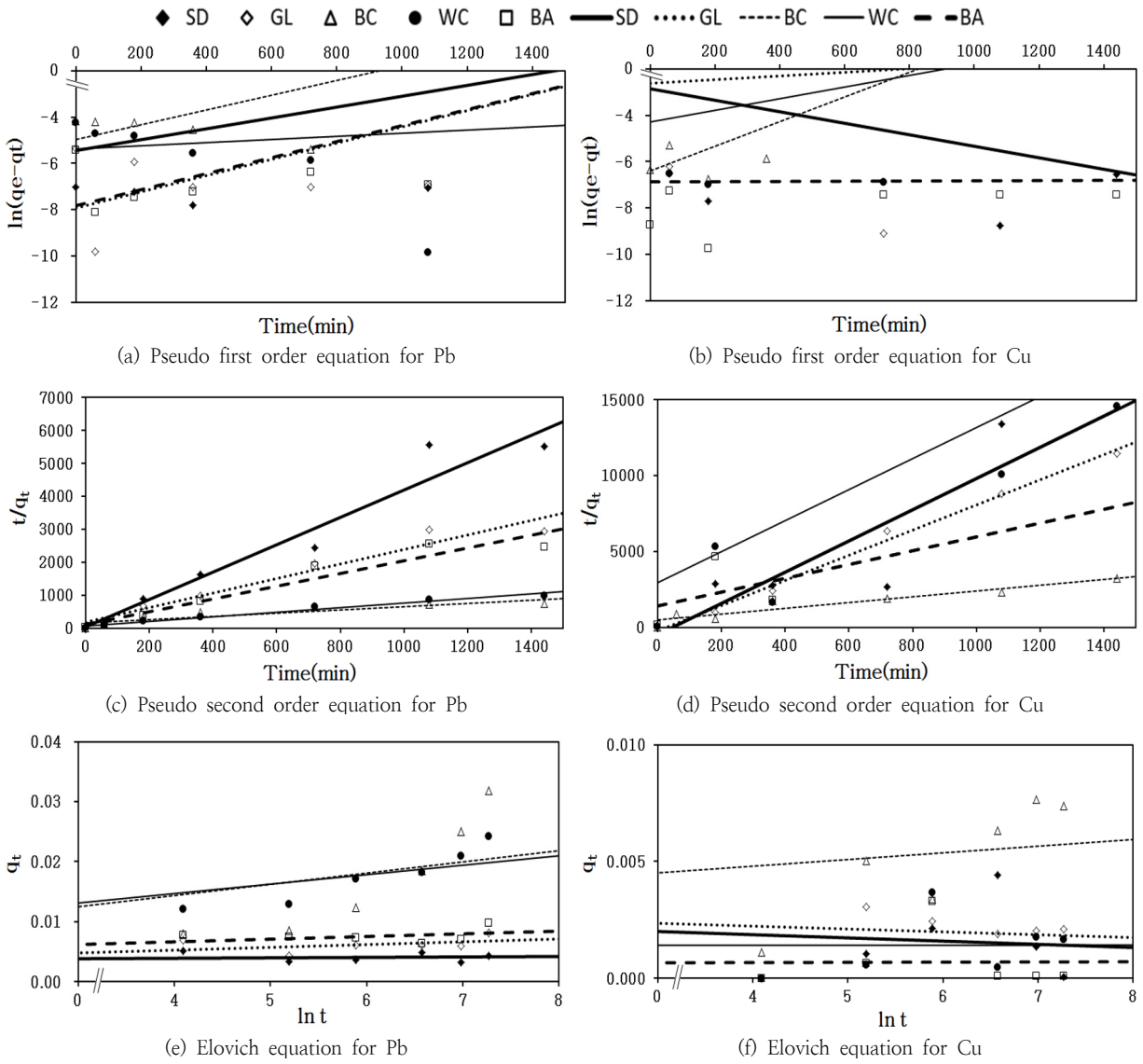


(a) Pb (b) Cu

Fig. 1. Effect of time on adsorption of Pb and Cu by filter media.

Table 3. Summary of calculated coefficients and determined coefficients of the Pb and Cu concentration for each filter media using Pseudo second order model

Parameters			SD	GL	BC	WC	BA
Pseudo-2	Pb	k_2	0.3956	0.0271	0.0013	0.0061	0.0282
		q_e	0.2406	0.4519	2.0803	1.4520	0.5198
		R^2	0.9487	0.9509	0.8235	0.9751	0.9314
	Cu	k_2	0.0339	0.2340	0.0075	0.2272	0.0290
		q_e	(0.0109)	(0.0038)	0.5232	(0.0039)	(0.0113)
		R^2	0.0178	0.1453	0.8997	0.1434	0.0186



(a) Pseudo first order equation for Pb (b) Pseudo first order equation for Cu

(c) Pseudo second order equation for Pb (d) Pseudo second order equation for Cu

(e) Elovich equation for Pb (f) Elovich equation for Cu

Fig. 2. Plots of Pb and Cu kinetic models using Pseudo first & Second and Elovich equation.

Table 4. Summary of calculated coefficients and determined coefficients of the Pb and Cu concentration for each filter media using Langmuir adsorption models

Parameters			SD	GL	BC	WC	BA
Langmuir-3	Pb	b	(0.2382)	(0.2496)	(0.6422)	(0.4551)	(0.2671)
		q_m	0.0003	0.0005	0.0064	0.0048	0.0008
		R^2	0.9999	0.9981	0.9488	0.9729	0.9969
	Cu	b	(0.2187)	(0.2147)	(0.2435)	(0.2158)	(0.2145)
		q_m	0.0000	0.0000	0.0003	0.0000	0.0000
		R^2	0.9992	0.9993	0.9979	0.9993	0.9999

3.1.2 Langmuir isotherm 적용을 통한 이론적 최대 흡착능 평가

흡착 Kinetic model에 흡착실험 결과를 적용하여 Pb와 Cu의 여재표면에 대한 흡착이 Langmuir model에 기반을 두는 화학흡착 반응인 것으로 분석되었다. 이에 본 연구의 흡착결과를 Langmuir isotherm에 적용하여 q_m (mg/g) 값을 산정하였으며 Fig 3에 나타내었다. 3가지 Langmuir isotherm중에서 Langmuir-3 isotherm의 R^2 값은 Pb의 경우 0.9488에서 0.9999의 범위의 상관성을 보이는 것으로 분석되었다. Cu의 경우 0.9979에서 0.9999까지 범위의 1에 매우 근접한 R^2 값을 나타냈으며 Fig 3에 도시된 것과 같이 Langmuir-1, Langmuir-2에 비해 가장 양호한 직선 관계를 이루어 Pb와 Cu의 흡착 실험결과는 Langmuir-3 isotherm을 따른다고 판단된다. Tabel 4는 Langmuir-3 isotherm 적용 결과를 정리하여 나타낸 것으로 Pb의 q_m (mg/g) 값은 SD에서 0.0003으

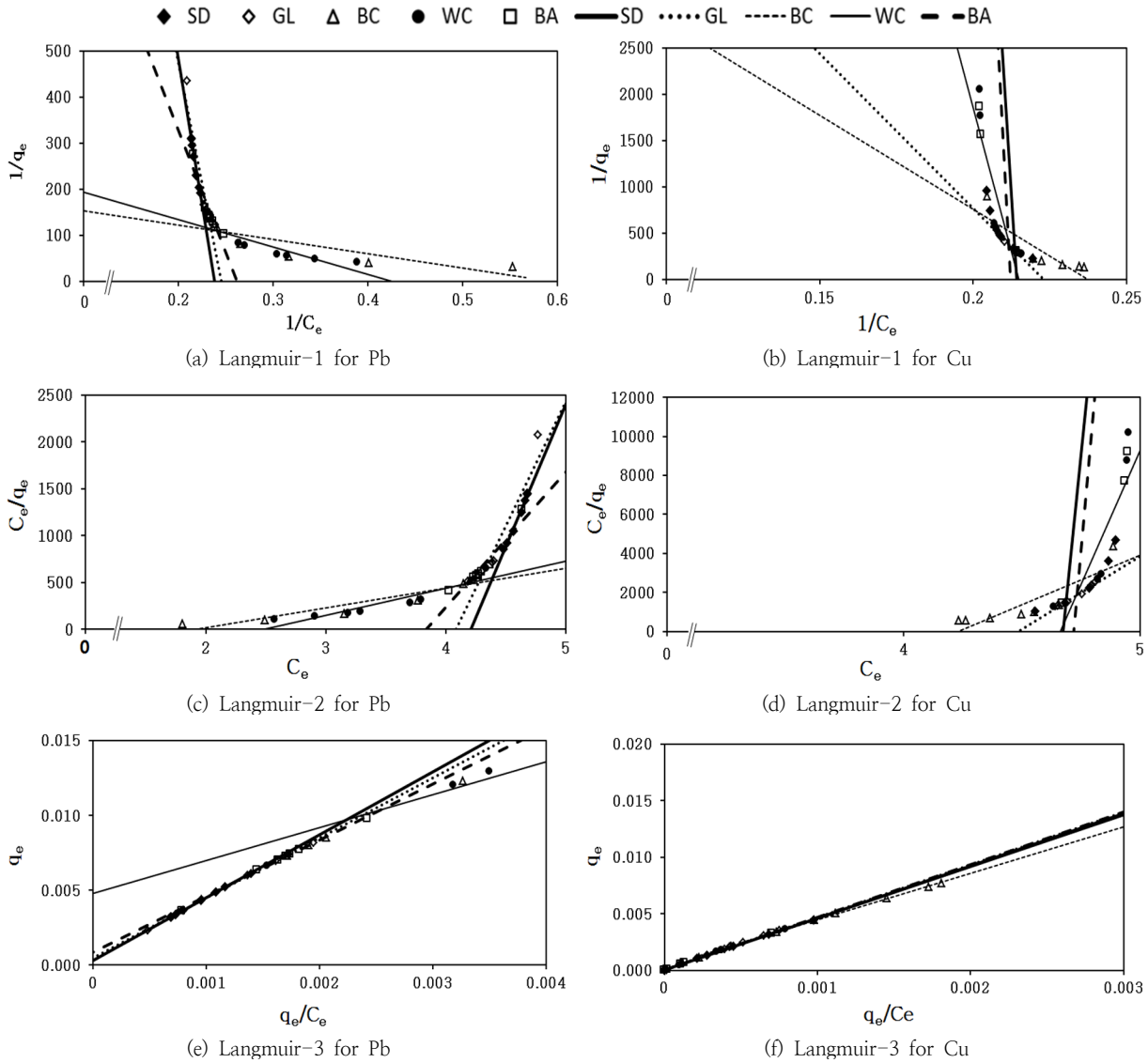


Fig. 3. Plots of the Pb and Cu Langmuir isotherm models.

로 가장 작았으며 BC에서 0.0064로 분석되었으나 실제 흡착 실험결과에 비해 낮게 산정되었다. Cu의 경우 SD에서 0.00004, BC에서 0.0003로 나타나 본 연구에서 진행된 흡착 실험 결과에 비하여 낮게 산정되었다.

3.2 pH 조건별 여재의 중금속 탈착능 평가

pH는 안정한 형태로 토양 혹은 여재표면에 존재하는 중금속을 탈착시키는 중요한 요인으로서 pH가 낮아지면 중금속과 결합하고 있는 carbonate 혹은 hydroxide가 용해되고, 중금속 이온과 수소 양이온 사이에 흡착경쟁 현상이 발생하며 음전하를 띠고 있던 토양 혹은 여재 표면이 양전하를 띠기 때문에 중금속과 이온과의 정전기적 인력이 감소하게 되고 탈착이 이루어지게 된다(Franchi and Davis, 1997). 따라서, 본 연구에서는 pH 2.7-2.8, pH 5.8-6.0 및 pH 6.8-7.5 등 3가지 조건을 기준으로 탈착 실험 결과를 분석하였다. 환경부 기준에 의하면 Pb와 Cu의 경우 3 mg/L 이상 탈착시 환경에 유해한 영향을 미치는 것으로 고시되었다(MOE, 2011). Fig 4는 흡착이 끝난 여재를 사용하여 pH 조건별로 탈착 실험을 진행하였을 때의 결과와 환경부 유해물질 탈착 한계농도에 대한 그래프를 나타낸 것으로 탈착 실험 결과, 3가지의 pH 환경에서 SD, GL, BC, WC 및 BA 모두 Pb와 Cu가 탈착된 후의 농도가 3 mg/L 이하로 나타나 탈착 한계농도에 미치지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 본 탈착실험결과를 바탕으로 주어진 pH 환경에서 5가지의 여재를 LID 시설에 사용할 경우 시설내부에서 탈착으로 인한 오염이 발생되지 않기에 여재로써 안전하게 사용 가능할 것으로 판단된다.

탈착 실험 결과를 통해 5가지 여재 모두 LID 시설 적용에 적합할 것으로 판단되었으나, 여재에 흡착된 중금속 농도를 기준으로 하여 각기 다른 pH 조건에서 탈착된 농도

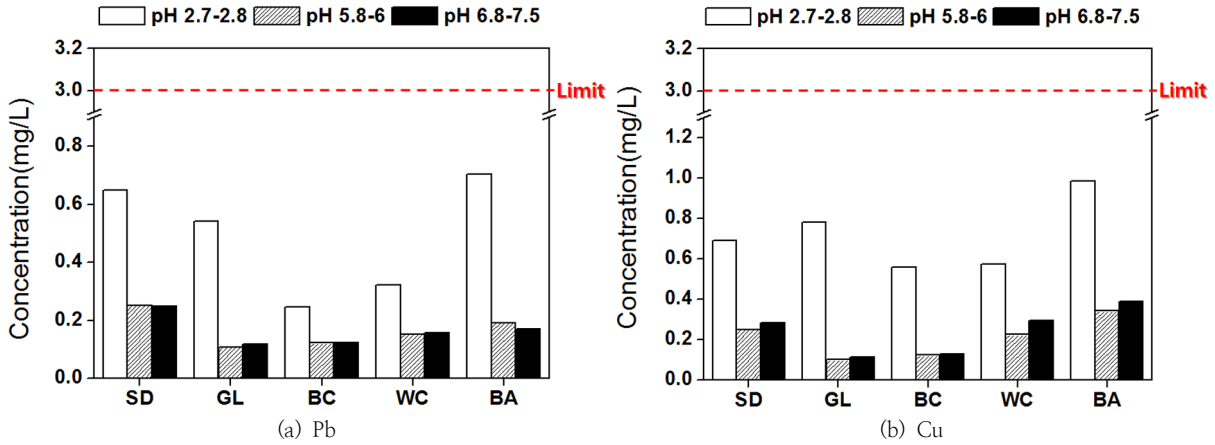


Fig. 4. Concentrations of Pb and Cu leached by each filter media (MOE, 2011).

Table 5. Summary of adsorption and desorption capabilities of each filter media

Parameters		SD	GL	BC	WC	BA
Heavy metals adsorption affinity		Pb>Cu	Pb>Cu	Pb>Cu	Pb>Cu	Pb>Cu
Kinetic models		Pseudo second order equation				
Equilibrium isotherm		Langmuir-3 isotherm				
Pollutant emission limits		○	○	○	○	○
Based on the adsorption by desorption[1]	Pb	○	○	◎	◎	◎
	Cu	×	○	○	○	×
Economics[2]		◎	◎	○	◎	◎
Accessibility[3]		○	○	△	○	×

1) Adsorption(AD)=Desorption(DE): (×), AD>DE(less than 0.5mg/L): (○), AD≫DE(more than 0.5mg/L): (◎)
2) 10,000(₩/kg)≥: (◎) , 10,000≤x≤100,000(₩/kg): (○), 100,000(₩/kg)≤: (×)
3) Generally: (○), The patented: (△), Hard: (×)

를 조사하였다. pH 2.7-2.8의 조건에서 탈착 실험을 수행한 결과, Pb의 경우 5가지 여재중 SD에서 표면에 흡착되었던 중금속 이온이 전량 탈착되었으며, Cu의 경우 5가지 여재에서 흡착되었던 이온이 전량 탈착 된 것으로 분석되었다. pH 5.8-6.0, pH 6.8-7.5의 조건에서 Cu의 경우 GL, BC 및 WC에서 탈착 실험이 완료된 후에도 0.5 mg/L 이하의 농도가 여재 표면에서 탈착되지 않은 것으로 조사되었으며, Pb의 경우 SD의 표면에는 0.5 mg/L 이하, GL, BC, WC 및 BA의 표면에는 0.5 mg/L 이상 흡착되어 있는 것으로 분석되었다. 본 연구에서 수행되었던 등온 흡착 실험과 동일하게 5 가지 여재는 Cu에 비하여 Pb에 대한 흡착력이 뛰어난 것으로 분석되었다. 또한 BC와 WC의 경우 강산성 조건에서도 매우 뛰어난 흡착능을 가지는 것으로 분석되어 LID 시설에 적용되었을 때 Pb와 Cu에 대하여 높은 저감 효과를 가질 것으로 판단된다.

3.3 여재별 흡착 및 탈착 특성 평가

본 연구는 LID 시설에 적용될 여재의 특성을 평가하기 위하여 진행되었으며 흡착 및 탈착 실험을 통하여 도출된 결과를 Table 5에 정리하여 나타내었다. 본 연구에 사용된 SD, GL, BC, WC 및 BA의 경우 혼합되어있는 중금속 이온 중 Pb에 대하여 선택적인 흡착이 이루어지는 것으로 조사되었으며, Pb>Cu의 흡착 선호도를 가지는 것으로 분석되었다. 여재별 이론적 최대흡착량(q_m, mg/g)의 산정은 Pseudo second order equation과 Langmuir-3 isotherm의 적용성이 높은 것으로 분석되었다.

pH 조건별 탈착실험결과, 5가지 여재 모두 pH 2.7-2.8, pH 5.8-6.0 및 pH 6.8-7.5 범위에서 탈착 한계 값을 초과하지 않아 LID 시설에 적용되는 여재로서 안전한 것으로 분석되었다. 특히 BC와 WC의 경우 Pb에 대한 뛰어난 흡착능을 가지는 것으로 조사되었으며, Cu의 경우 GL, BC 및 WC에서 높은 흡착능을 보였다. 비점오염 시설에 적용되는 여재는 흡착 및 탈착 능력뿐만 아니라 경제성 및 용이성 등에 대한 종합적인 고려가 필요하다. SD, GL 및 WC는 친환경적이며 구입이 용이한 여재로서 여과시설에 널리 사용되고 있으며, BA의 경우 산업폐기물로서 취급에 다소 어려움이 따른다. BC의 경우 Pb와 Cu에 대한 흡착능이 매우 뛰어나지만 특허품으로서 다른 여재들에 비하여 여재의 구매금액이 비싸기 때문에 LID 시설 설치비용이 증가할 수 있다. 또한, BC는 황토를 사용하여 개발된 여재로 흡착 및 탈착 실험 완료 후 여재가 부서지면서 추출용액의 탁도가 높아지는 경향을 보였다. 따라서 적용하려는 LID 시설의 종류와 처리기작 및 처리 대상 면적으로부터 발생되는 오염물질 항목에 따라 본 실험결과를 바탕으로 효율적인 여재 선택이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 LID 시설에 적용될 여재의 특성 평가를 위하여 진행되었다. 전체 5가지 여재(SD, GL, BC, WC 및 BA)의 제원, 경제성 및 중금속(Pb, Cu)에 대한 흡착 및 탈착 특성에 대한 분석을 수행하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 시간에 따른 등온 흡착실험 결과, 여재의 흡착사이트에 대해 용매와 중금속(Pb, Cu)간의 경쟁이 강하지 않고 중금속이 흡착제의 표면에 단층으로 흡착하는 경향을 가지는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용된 SD, GL, BC, WC 및 BA에서 혼합된 중금속 이온 중 Pb에 대한 흡착 선호도가 Cu에 비하여 큰 것으로 판단된다.

2) Kinetic model과 Langmuir isotherm에 흡착실험 결과를 적용한 결과, Pseudo second order equation과 Langmuir-3 isotherm의 적용성이 높은 것으로 분석되었으며, 이를 바탕으로 여재와 중금속의 흡착 작용은 화학흡착 반응인 것으로 판단된다. 흡착실험 결과를 Pseudo second order equation과 Langmuir-3 isotherm에 적용하여 q_m (mg/g)을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

3) 여재의 탈착 실험 결과를 국내 유해물질 기준 탈착 한계 값과 비교한 결과 SD, GL, BC, WC 및 BA 모두 pH 2.7-2.8, pH 5.8-6.0 및 pH 6.8-7.5 범위에서 탈착 한계 값을 초과하지 않아 LID 시설에 적용되는 여재로서 안전한 것으로 분석되었다. BC와 WC의 경우 Pb에 대한 뛰어난 흡착능을 가지는 것으로 조사되었으며, Cu의 경우 GL, BC 및 WC에서 높은 흡착능을 보였다.

4) SD, GL 및 WC는 친환경적이며 구입이 용이한 여재로서 여과시설에 널리 사용되고 있으며, BA의 경우 산업폐기물로서 취급에 다소 어려움이 따른다. BC의 경우 Pb와 Cu에 대한 흡착능이 매우 뛰어나지만 특허품으로서 다른 여재들에 비하여 적용 및 연구 사례가 적으며 흡착 및 탈착 실험 후 추출용액의 탁도가 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 적용하려는 LID 시설의 종류와 처리기작 및 처리 대상 면적으로부터 발생하는 오염물질 항목에 따라 본 실험결과를 바탕으로 효율적인 여재 선택이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국토교통부의 국토교통기술촉진연구사업 “도시 대기-수환경 개선위한 스마트 그린인프라 기술(레인가든)개발 (과제번호:14CTAP-C086804-01)”과제의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Dow, CL, Dewalle, DR (2000). Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in Eastern United States, *Water Resources Research*, 36, pp. 1835-1843.

Franchi, A, Davis, AP (1997). Desorption of cadmium(Ⅱ) from artificially contaminated sediments, *Water, Air and Soil Pollution*, 100, pp. 181-196.

Giles, CH, MacEwan, TH, Nakhwa, SN, Smith, D (1960). Studies in adsorption. Part Xl. A system of classification of solution adsorption isotherms and its use in diagmosis of adsorption mechanisms and in measurements of specific surface areas of solids, *J. of The Chemical Society*, 10, pp. 3973~3993.

Gorme, J. B(2011). Application of bottom ash as filter media for stormwater treatment facility, *Master's thesis, Kongju National University*, Chungcheongnam-do, Korea. [Korean Literature]

Helsel, DR, Kim, JI, Grizzard, TJ, Randall, C and Hoehn, RC (1979). Land use influences on metals in storm drainage, *J. of the Water Pollution Control Federation*, 51(4), pp. 709.

Hewitt, CN, Rashed, MB (1992). Removal rates of selected pollutants in the runoff waters from a major rural highway, *Water Research*, 26(3), pp. 311-319.

Jeon, C, Kim, JH (2007). Heavy Metal Removal Using Sawdust, J. of KORRA, 15(2), pp. 81-88. [Korean Literature]

Juang, RS, Chen, ML (1997). Application of the Elovich Equation to the Kinetics of Metal Sorption with Solvent-Impregnated Resins. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36, pp. 813-820.

Kang, CG, Maniquiz, MC, Son, YG, Cho, HJ, Kim, LH (2011). Development of small constructed wetland for urban and roadside areas, *J. of Wetlands Research*, 13(2), pp. 231-242. [Korean Literature]

Kang, HM, Lee, JG, Kand, HJ, Ko, SO, Kim, LH (2006). Adsorption characteristics of filter media for treating highway stormwater runoff, *The Spring Conference of tje Korean Society of Environmental Engineering*, pp. 821-826. [Korean Literature]

Kim, LH and Kang, JH (2004). Determination of Event Mean Concentrations and Pollutant Loadings in Highway Storm Runoff, *J. of Korean Society on Water Quality*, 20(6), pp. 631-640. [Korean Literature]

Kim, LH and Lee, SH (2005). Characteristics of Washed-off Pollutants and Dynamic EMCs in a Parking Lot and a Bridge during Storms, J. of *Korean Society on Water Quality*, 21(3), pp. 248-255. [Korean Literature]

Kim, LH (2008). Low Impact Development (LID) Technology for The 21st centey Eco-Friendly Construction, *Magazine of Korea Water Resources Association*, 41(6), pp. 47-57. [Korean Literature]

Lee, CY, Chung, JS, Shin, EW (2008). Sorption Behavior of Acetic Acid onto Activated Carbons, *J. of Korean Chemical Engineering Research*, 46(6), pp. 1130-1134. [Korean

Literature]

Na, CK, Han, MY, Park, HJ (2011). Applicability of Theoretical Adsorption Models for Studies on Adsorption Properties of Adsorbents(1), *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 33(8), pp. 606-616. [Korean Literature]

Ministry of Environment (MOE) (2011). Korea Standard Leaching Test, *Ministry of Environment, Korea*. [Korean Literature]

Ministry of Environment (MOE) (2012). The 2nd Phase NPS Management Measures, *Ministry of Environment, Korea.* [Korean Literature]

Randall, CW, Helsel, DR, Grizzard, TJ and Hoen, RC (1978). The impact of atmospheric contaminants on storm water quality in an urban area. *Progress in Water Technology,* 10(5), pp. 417-431.