

탄화물 및 제올라이트 여재를 사용하는 UNFS(Upflow Non-point source Filtering System) 시설의 노면배수에 함유된 중금속 제거 특성

김부길 · 박한주 · 김일룡*

동서대학교 토목공학과 · *(주)한성개발공사 상하수도부
(2008년 7월 4일 접수; 2008년 8월 29일 수정; 2008년 9월 22일 채택)

Characteristics of UNFS Using Carbide Pellet and Zeolite Pellet to Remove Heavy Metals Contained in Road Runoff

Boo-Gil Kim, Han-Ju Park and Il-Ryong Kim*

Division of Architecture and Civil Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea

*Hansung Engineering & Consulting Co., Busan 328-122, Korea

(Manuscript received 4 July, 2008; revised 29 August, 2008; accepted 22 September, 2008)

Abstract

Road runoff, one of non-point source pollutants, contains various heavy metals, most of which flow into discharge waters without being treated. The mechanism of removing the heavy metals in water is similar to that of removing micro-particles. Therefore, it is considered that it is possible to remove a lot of the heavy metals contained in the road runoff by filtering or absorbing them. In this paper, performed has been a basic study on the characteristics of UNFS (Up Flow Non-Point Source Filtering System) using carbide pellet and zeolite pellet as double-layer filtering mediums to treat the road runoff. The removal rate with filtering and absorption time has been shown as follows: 29.0% for Cr; 27.8% for Cd; 25.7% for Fe; 25.4% for Co; 21.2% for Pb; 19.6% for Zn; 18.2% for Al; 17.0% for Mn; 11.3% for Ni; 7.5% for Cu. The overall removal rate according to influx change has been shown to be approximately 30%, and the load of heavy metals flowing out in initial precipitation could be reduced by using carbide as a recycling filtering medium. When the removal as coarse particles settle is added up, it is expected that UNFS will result in a higher removal rate.

Key Words : Non-point source pollutants, Road runoff, Heavy metal, UNFS, Carbide pellet, Zeolite pellet

1. 서 론

공공수역으로 유입되는 오염물질은 크게 점오염원(point source pollutants)과 비점오염원(non-point

source pollutants)으로 구분할 수 있다. 하수, 공장폐수와 같은 점오염원은 일정한 지점에서 지속적으로 배출되므로 처리시설을 통한 관리가 용이하지만, 노면배수처럼 발생원이 불특정하며 강우에 직접적인 영향을 받는 비점오염원은 대부분 미처리 상태로 주변 수계로 유입되어 하천 토양 및 수환경을 오염시키고 있는 실정이다^{1~3)}.

Corresponding Author : Boo-Gil Kim, Division of Architecture and Civil Engineering, Dongseo University, Busan 617-716, Korea
Phone: +82-51-320-1790
E-mail: bookim@dongseo.ac.kr

비점오염원은 강우 시 유출되므로 지역별 토지이용 특성, 지질·지형 등의 공간적 특성, 그리고 강우 사상 등의 시간적 특성에 따라 발생량이 크게 변화하므로 예측 및 정량화가 어렵고, 강우 초기에 노면에 축적되어 있던 오염물질이 일시에 고농도로 배출되는 특성을 지니고 있다^{4,5)}.

불투수층인 도로의 노면에는 대기오염물질 강하물과 자동차 운행과정에서 발생하는 각종 오염물질이 퇴적되며, 강우시 미처리 상태로 수계로 유입되는 노면배수에는 다양한 종류의 중금속이 다량으로 함유되어 있는 것으로 보고되고 있다^{2,6,7)}. 차량운행 과정에서 발생하는 중금속의 종류는 각각 타이어 마모에서 Zn, Cd, 브레이크 마모에서 Pb, Cu, Cr, Mn, 엔진 마모와 연료 누출 등에서 Al, Cu, Cr, Ni 등으로 조사되었다⁷⁾. 이러한 종류의 중금속은 자연 상태에서 분해되기가 어렵고 오랜 시간동안 축적되며 미량으로도 강력한 독성을 지니고 있다. 비점오염원의 한 종류인 노면배수에 함유된 중금속은 다양한 이동매체를 통하여 대기권, 수권, 토양권, 생물권을 포함한 지구화학적 환경으로 분산되어 인간을 비롯한 유기생명체에 치명적인 피해를 입힐 수 있으므로 가능한 한 제거되어야 할 것이다.

수중에 존재하는 중금속을 포함한 미량오염물질은 용존 및 입자성 형태로 존재하므로 중금속은 미세입자와 유사한 제거 기구를 나타낸다는 보고가 있다^{2,8)}. 또한, 노면퇴적입자의 크기가 74 μm 이하인 미세입자의 중량비율은 총 중량대비 0.6~1.3% 범위 내 불과하지만, 유해중금속 농도는 조대입자에 비해서 높으며, 대부분이 강우시 노면배수와 함께 유출된다고 하는 보고도 있다⁹⁾.

그러나 현재 개발 및 상용화된 초기우수 처리장

치의 제거 메카니즘은 협잡물 제거를 위한 스크린과 조대입자의 중력침강에 초점을 두고 있으므로 미세입자나 중금속을 포함한 미량오염물질은 거의 제거되지 않고 있다. 초기강우 유출수에 함유된 중금속으로 인한 방류 구역에의 악영향을 방지하려면, 여과기능이나 흡착기능을 부가한 초기우수 처리장치를 개발해야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 여과와 흡착이 가능한 탄화물 펠릿과 제올라이트 펠릿을 이중층 여재로 사용하여 노면배수를 처리하는 상향류식 비점오염원 여과 시스템 (Upflow Non point source Filtering System, 이하 "UNFS"라 한다)에 의한 중금속의 제거 특성에 관한 기초적 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

노면배수에 함유된 중금속의 제거 특성을 검토하기 위하여 UNFS에 사용된 여재는 Pic. 1과 같이 3가지 종류이며, Table 1에 물리적 특성을 나타내었다. 탄화물은 하수슬러지를 450~550°C에서 약 1시간 열분해하여 생성된 것이며, 탄화물 펠릿은 탄화물 40%에 PE 60%를 합성하여 제조하였다. 제올라이트 펠릿은 결정수 함량이 높고 다공성 구조이며 비표면적, 양이온 교환용량 그리고 선택적 흡착능이 커서 중금속 흡착이 가능한 제올라이트^{10,11)} 40%와 PE 60%를 합성하여 제조하였다. 예비실험으로 측정된 3가지 여재의 투수계수(m/min)는 0.592~0.675로 나타났다.

노면배수에 함유된 중금속의 제거 특성을 검토하기 위하여 UNFS에 유입되는 원수는 도로면 청소차량에 의해 정기적으로 수거되는 노면퇴적물을 이용

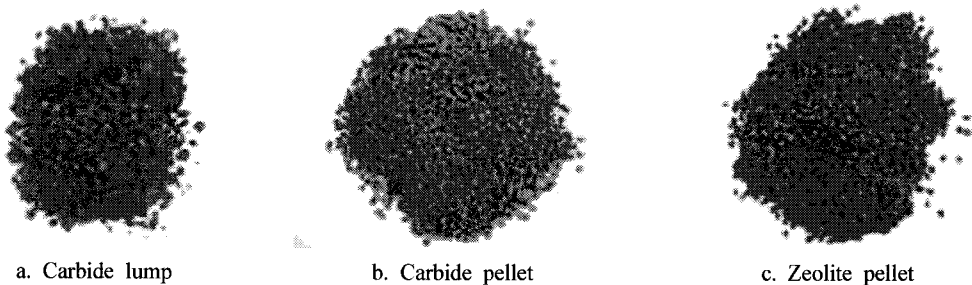


Fig. 1. Picture of filtering mediums.

Table 1. Physical properties of filtering mediums

Filtering mediums	Shape	Size (mm)	Specific gravity	Specific gravity (kgf/cm ³)	Material	Percentage of void (%)	K(m/min)
① Carbide lump	Irregularity spherical shape	About 2~8	1.10 ~ 1.20	200 ~ 250	100% carbide	54.0	0.592
② Carbide pellet	Oval	About 4		200 ~ 250	60%PE + 40%carbide	35.8	0.648
③ Zeolite pellet	Spherical shape	About 5		250	60%PE + 40%zeolite	42.4	0.675

하여 조제하였다. 본 실험에 사용된 노면퇴적물은 총연장 15.7 km이며 2007년 기준 일평균 통행량 87,131대 중 대형차 통행량이 41.4%를 차지하는 도로특성을 지니고 있는 도시고속도로에서 수거한 것으로, 인근 터널과 해상대교의 대형차 통행량 5.3%와 8.5%보다 상대적으로 많은 곳의 시료이다.

대형차 통행량이 약 40%를 차지하는 도시고속도로에서 수거한 노면퇴적물의 입자사이즈별 비율을 Table 2에 나타내었다. 총중량 15,077g의 노면퇴적물 중 2,000 μm 이상의 부유성 조대입자는 3158.6g으로 20.9%를 차지하였고, 약 1,000 μm 이하의 미세입자는 50% 이상으로 나타났다. 그리고 74 μm 이하인 미세입자의 중량비율은 총 중량대비 1.7%를 보였다. 본 실험에 사용된 원수는 조대입자를 제외한 2,000 μm 이하의 노면퇴적물을 사용하여 조제하였다.

노면퇴적물 20 kg을 계량한 후 수도수 200L가 채워진 저류조에 투입하고 입자에 부착된 중금속을 분리시키기 위하여 5시간 동안 교반하였고, 12시간 침전후의 상등액 100L를 수도수 400L로 희석하여 원수로 하였다. 조제된 원수의 중금속 농도 및 SS 농도, 탁도는 Table 3에 나타나 있다.

Table 2. Particle distribution of deposited road particles

Particle size(um)	Weight (g)	Rate (%)
① > 2,000	3158.6	20.9
② 850~2,000	4216.3	28.0
③ 425~850	3726.2	24.7
④ 250~425	2086.4	13.8
⑤ 150~250	1133.4	7.5
⑥ 74~150	492.7	3.3
⑦ < 74	263.4	1.7
Total	15077.0	100.0

2.2. 실험방법

노면배수에 함유된 중금속을 제거하기 위하여 본 실험에 사용된 상향류식 여과장치를 Fig. 1에 나타내었다. 상향류식 여과장치는 원수저류조 및 교반장치, 여재부, 유량밸브로 구성된다. 원수저류조에 위에서 언급한 원수 250L를 채운 후, 실험 시간동안 원수 농도를 균일하게 유지하기 위하여 교반하였고 동시에 펌프를 사용하여 내부 순환을 하였다.

중금속 제거 특성은 다음의 두 가지 경우에 대하여 실험적 검토를 하였다. 먼저, 여과 및 흡착시간에 따른 중금속 제거특성을 검토하였고, 다음 단계로 유입수량 변동에 따른 중금속 제거효율의 검토를 수행하였다. 여과 및 흡착시간에 따른 중금속 제거 특성에 관한 실험의 여재로는 탄화물 펠릿을 사용하였고, 유입수량 변동에 따른 중금속 제거효율은 탄화물, 탄화물 펠릿, 제올라이트 펠릿을 각각 사용하여 검토하였다.

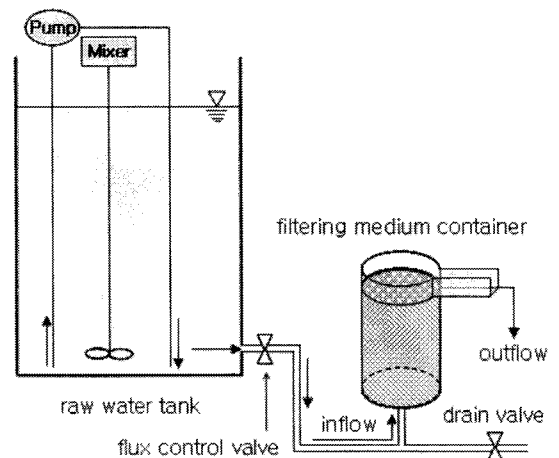


Fig. 1. Upflow filtration experiment equipment.

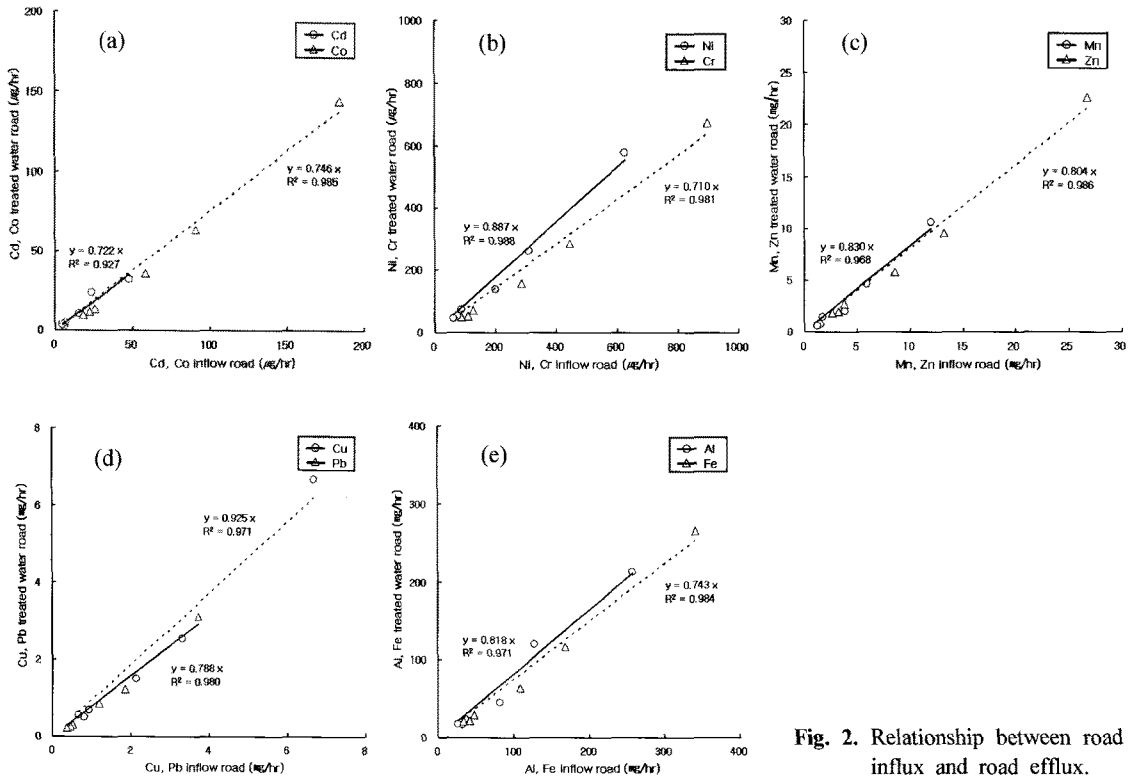


Fig. 2. Relationship between road inflow and road efflux.

을 나타내었다. Sansalone 등⁷⁾은 Al, Fe는 입자상의 형태로 배출되며, Cr, Pb는 용존과 입자의 중간 형태로 배출된다고 보고하였다. 이 등²⁾은 Cu, Fe, Zn 등의 중금속은 입자상 물질, 특히 TSS에 많은 양이 부착되어 유출되고 상관성이 높다는 연구결과를 제시하였다. Fig. 3에서 알 수 있듯이, 본 실험에서도 상기에 거론된 입자성 형태로 배출되는 Cu, Fe, Zn, Al과 중간적 형태로 배출되는 Cr, Pb, 그리고 거론되지 않은 Co, Mn의 중금속 제거특성은 여과시간에 따라 증가하는 SS 제거특성과 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 미세입자와 중금속의 제거특성에는 상관성이 있으며, 노면배수에 함유된 중금속은 미세입자를 여과 또는 흡착으로 제거 가능한 것으로 판단되었다.

유입수량 변동에 따른 여재별 유출수의 중금속 농도는 Table 4-(a)~4-(c)와 같다. 유입수량은 약 100 ml/min~2,000 ml/min의 범위이고 10단계로 상승 시키면서 변동시켰다. 이러한 범위의 유입수량과 여재량에서는 제거율에 관한 뚜렷한 경향을 찾

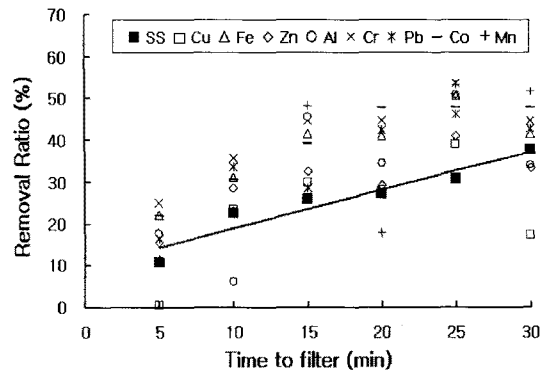


Fig. 3. Removal rate(%) of SS and heavy metal with filtering time.

기가 어려웠다.

중금속 농도가 미미한 관계로 실험 오차 범위로 생각되어지는 결과 값을 제외한 제거율을 유입부하량 대비 유출부하량의 관계로 구하여 Table 5에 나타내었다. 탄화물 펠릿(C.P.)과 제올라이트 펠릿(Z.P.)의 중금속에 대한 전체적인 제거율은 약 30%

Table 5. Heavy metal removal rate with filtering mediums according to the equation of correlation between influx load and efflux load (%)

	Filtering mediums			
	C.L.	C.P.	Z.P.	
Heavy metal removal rate according to correlation equation (%)	Cd	33.3	33.3	33.3
	Co	14.2	31.2	26.0
	Ni	11.6	17.9	17.7
	Cr	17.3	36.7	30.5
	Mn	15.7	36.7	31.5
	Zn	8.9	30.8	26.0
	Cu	16.8	19.6	17.9
	Pb	15.9	28.5	32.3
	Al	12.8	29.4	27.9
	Fe	15.3	33.9	28.6
	As		-	-
	Hg		-	-

정도로 비슷하며 탄화물(C.L.)보다는 중금속 제거에 유용한 여재로 판단되었다. 이는 중금속 흡착이 가능한 제올라이트를 합성한 제올라이트 펠릿 및 미세입자의 제거효율이 높은 탄화물 펠릿이 지니는 여재 특성에 기인하는 것으로 판단되었다. 특히, 입자상 형태로 배출되는 Cu, Fe, Zn, Al은 탄화물 펠릿에 의해 비교적 높은 제거율을 보였다.

본 실험의 대상 지역인 도시고속도로에 강우강도 5 mm/hr의 초기강우가 노면을 통하여 방류수역으로 유출되는 경우, 도로노면 면적 1 km²에서 발생하는 중금속 부하량은 Cu : 0.52 kg/hr, Fe : 26.58 kg/hr, Zn : 2.09 kg/hr로 계산되었으며, 유출부하량을 30% 감소시키기 위해서는 약 0.08 m³의 여재량이 필요한 것으로 나타났다. 그러나, UNFS의 구조상 침전성이 큰 조대입자는 여과층에 유입되기 전에 침전조 및 장치부에서 제거되기 때문에 UNFS를 설치하는 것으로 노면배수로 기인하는 중금속 유출부하량은 상당히 감량화시킬 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

상향류식 비점오염원 여과 시스템의 여재로 탄화물 펠릿과 제올라이트 펠릿을 사용하여 노면배수에

함유된 중금속 제거에 관한 실험을 수행하였다. 여과 및 흡착시간에 따른 중금속 제거특성과 유입수량 변동에 따른 중금속 제거효율을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 여과 및 흡착시간에 따른 중금속 제거 실험에서, 유입부하량 대비 유출부하량으로 도출한 각 중금속의 제거율은 크기순으로 Cr : 29.0%, Cd : 27.8%, Fe : 25.7%, Co : 25.4%, Pb : 21.2%, Zn : 19.6%, Al : 18.2%, Mn : 17.0%, Ni : 11.3%, Cu : 7.5%로 나타났다.

2) 입자성 형태로 배출되는 Cu, Fe, Zn, Al 등의 중금속은 SS와 유사한 제거특성을 보였고, 노면배수에 함유된 미세입자를 여과 또는 흡착하는 것으로 일부 중금속은 제거 가능할 것으로 생각되었다.

3) 유입수량을 변동시키고 탄화물 펠릿을 여재로 사용하는 경우, 유입 및 유출부하량으로 산출한 입자상 형태로 배출되는 중금속의 제거율은 각각 Cu : 19.6%, Fe : 33.9%, Zn : 30.8%, Al : 29.4%로 나타났다.

중금속흡착이 가능한 제올라이트로 합성한 제올라이트 펠릿 및 미세입자의 제거효율이 높은 탄화물 펠릿의 중금속에 관한 전체적인 제거율은 약 30% 미만이지만, 초기강우 시 방류수역에 유출되는 중금속 부하량을 소량의 재활용 여재로 경감시킬 수 있고, 조대입자의 침전에 의한 제거율을 합쳐서 고려하면 UNFS의 설치는 노면배수로 기인하는 중금속 유출부하량을 상당히 감량화시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 1) 최지용, 신창민, 2002, 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안, 한국환경정책 평가연구원, 연구보고서, KEI/2002/RE-03
- 2) 이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 임경호, 이병식, 김이형, 2006, 고속도로 노면유출수의 중금속 유출 특성 및 상관성, 한국물환경학회지, 22(1), 128~133.
- 3) 노성덕, 이대근, 전양근, 2004, 도로상의 비점오염물질 저감을 위한 초기 우수유출수 처리에 관한 연구, 한국물환경학회지, 20(5), 525~533.
- 4) 환경부, 2006, 비점오염원관리 업무편람.
- 5) Larsena T., Brochb K., Andersen M. R., 1998, First flush effects in an urban catchment area in Aalborg, Water Sci Technol, 37(1), 251-257.
- 6) Lee J. H., Bang K. W., Ketchum L. H., Choe J. S., Yu M. J., 2002, First flush analysis of urban storm runoff, Sci Total Env., 293, 163-175.

- 7) Sansalone J. J., Buchberger S. G., Al-Abed S. R., 1996, Fractionation of Heavy Metals in Pavement Runoff, *Sci Total Env.*, 189-190, 371-378.
- 8) Sansalone J. J., Buchberger S. G., 1997, Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater, *Water Sci Technol*, 36(8-9), 155-160.
- 9) 김부길, 이병철, 2006, 노면퇴적물의 입자 크기에 따른 중금속 오염에 관한 연구, *한국환경과학회지*, 15(12), 1171-1175.
- 10) 서정윤, 2007, 수직흐름 제올라이트 갈대 여과상에 의한 생활하수 처리, *한국생물공학회지*, 22(2), 102-108.
- 11) 강한, 박성민, 장윤득, 김정진, 2008, 제올라이트와 벤토나이트를 이용한 중금속 흡착 특성, *한국광물학회지*, 21(1), 45-56.
- 12) 박상우, 오재일, 최영화, 김종화, 하재원, 2007, 도로노면 유출수의 비점오염원 배출 특성(2) - 중금속 및 병원성 미생물, *대한상하수도학회지*, 21(2), 235-242.