



## 하천수질정화용 토양여과의 여과용량 증대와 수질 개선을 위한 친환경 여재 특성 비교 Characteristics of soil and eco-friendly media for improving the filterability and water quality in soil filtration

기동원<sup>1</sup> · 조강우<sup>1</sup> · 원세연<sup>1,2</sup> · 송경근<sup>1\*</sup> · 안규홍<sup>1</sup> ·

Dongwon Ki<sup>1</sup> · Kang-Woo Cho<sup>1</sup> · Se-Yoen Won<sup>1,2</sup> · Kyung-Guen Song<sup>1\*</sup> · Kyu-Hong Ahn<sup>1</sup>

1 한국과학기술연구원 물환경센터, 2 연세대학교 토목환경공학과

(2010년 5월 4일 접수 ; 2010년 8월 12일 수정 ; 2010년 8월 13일 채택)

### Abstract

Nowadays, the challenges of ensuring good water quality and quantity of river are becoming more important for human society, but there has been troublesome for purifying river water. In this study, we performed the fundamental study of a river water treatment system using riverside soil and eco-friendly optimal media for improving river water quality and can also treat a large amount of river water. As the results of the physical and chemical characterization of the two different soils (Kyungan and Chungrang, The Republic of Korea), which were collected from real stream sides in the Han River basin, and five kinds of media (zeolite, perlite, steel slag, woodchip and mulch), both soils were all classified as a sand, and effective size ( $D_{10}$ ) and uniformity coefficient (U) of the soil were about 0.2 mm and 4 or so, respectively. Through the batch and column experiments with the soil and eco-friendly media, zeolite and mulch were found to be efficient for decreasing nitrogen. In addition, steel slag was especially superior to the other media for phosphorus removal. From soil reforming tests volume ratios were 2.8, 1, and 1 of Kyungan soil, zeolite, and steel slag hydraulic conductivity of mixed soil was increased  $1.30 \times 10^{-2}$  from  $2.85 \times 10^{-3}$  of Kyungan soil, and the removal efficiencies of nitrogen and phosphorus were also improved. These results show that reforming of the soil enhanced the purification of a large amount of water, and zeolite, mulch, and steel slag might be facilitated as proper functional media.

**Key words** : river water purification, soil filtration, environmentally-friendly media, soil reforming

**주제어** : 하천수 정화, 토양여과, 친환경 여재, 토양개량

### 1. 서론

하천수질과 관련한 규제의 강화와 종말처리시설 건설 및 하수관거 정비로 대표되는 환경기초시설에 대한 꾸준한 투자로 인하여 우리나라의 하천수질은 과거에 비하여 많이 개선되었으나 아직 만족스러운 수준에 도달하고 있지는 않다.

특히 그간의 환경기초시설 확충을 통한 점오염원 중심의 하천수질관리가 한계에 다다르고 있으며, 그와 동시에 오염원이 매우 어려운 비점오염원에서 기인하는 하천 오염의 비중이 점차 증가하고 있다(환경부, 2004; 신창민, 2004). 이에 반하여 하천수질에 대한 국민들의 기대 수준은 하천의 수생태계를 고려하는 단계로까지 높아지고 있어, 이를 만족

\* Corresponding author Tel:+82-2-958-5842, Fax:+82-2-958-6854, E-mail: kgsong@kist.re.kr(Song, K.)

시킬 수 있는 하천 수질정화기술에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다.

하천 수질정화기술로는 오염된 하천의 바닥이나 하안에 미생물이 부착할 수 있는 인공담체를 배치하거나, 하천수의 흐름을 막고 오염된 하천수를 고수부지로 끌어내어 인공처리시설을 이용하여 처리 후 다시 하천으로 유입하는 방식이 주를 이루었다. 그러나 이러한 기술들은 홍수가 반복되는 우리나라 하천의 특성에 맞지 않으며 생태계에 미치는 영향 등으로 인하여 널리 적용되지는 못하고 있다. 이러한 대안으로 인공습지, 하상여과, 토양여과와 같이 토양과 식생을 이용하는 자연친화적인 수질정화 기술들이 주목 받고 있다. 인공습지는 자연습지의 기능을 모방한 것으로 식생, 토양, 생물의 물리, 화학, 생물학적 과정을 통하여 수질을 개선하는 기술로서 처리속도가 다소 느려 많은 면적을 필요로 하며, 최고의 효율을 나타내기까지는 2-3년의 기간이 필요하며, 홍수시의 유실문제 및 모기 및 해충의 번식에 따른 문제점을 갖고 있다(환경부, 2004; Uhl and Dittmer, 2005). 이에 비하여 하상여과는 하천에 발달된 자연충적층을 이용하여 수질정화를 하게 되어 자연친화적이며 홍수 등에 강한 장점을 갖고 있다. 그러나 하상여과의 설치를 위해서는 퇴적층의 두께가 최소 수m 이상 되어야 하며 퇴적층의 투수계수도 일정 이상의 조건을 만족하여야 하기 때문에 널리 보급하기에는 다소 한계가 있다. 최근 이러한 하상여과의 한계를 극복하기 위하여 하천변에 잘 발달되어 있는 홍수터의 토양층을 이용하여 하천수질을 정화하고자 하는 시도들이 있다(Chung et al., 2004; 김호석 등, 2009; 하현수 등, 2002). 최명호 등(2009)의 연구에 따르면 우리나라에서 홍수터를 이용한 여과가 가능한 면적이 90,335,576m<sup>2</sup>으로 충분한 면적을 갖고 있으며, 토양 침투율은 한강상류 양평지역 0.36 m/day에서 낙동강하류 물금지역 8.20 m/day의 범위로 외국과 비교하여 토양여과가 가능한 범위이며, 표층토양을 치환 또는 피복 등에 의하여 개선하면 토양여과의 용량을 증가시킬 수 있는 것으로 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 홍수터를 이용한 토양여과에 있어 실제 하천의 표층 토양을 치환하여 토양여과의 용량을 개선하고자 하는 경우, 자연토양의 투수성 향상을 위한 개질 뿐만 아니라 수질개선의 효과를 높일 수 있는 친자연형 여재들의 처리특성을 비교함으로써 토양여과의 용량증대를 위한 토양개질에 적용 가능한 여재를 선정하는데 필요한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 토양 및 여재

본 연구는 하천의 표층토양을 치환하여 토양여과의 용량 개선을 위하여 적용이 가능한 친자연형 여재들의 특성을 비교하고자 하는 것으로서 실제 하천의 토양과 친자연형 여재들로 선정하여 특성을 비교하기 위한 실험을 진행하였다. 실제하천의 토양으로서는 수도권 하천토양의 일반적인 특성을 대표할 것으로 보이는 한강의 지류인 경안천과 중랑천의 홍수터의 토양을 선정하였다. 토양의 채취는 지표면에서 30cm 아래에 위치한 표토층의 토양을 채취하였다.

토양은 뛰어난 오염정화 특성을 지니고 있지만, 자연 토양을 이용할 경우 작고 불균질한 토양입경으로 인하여 대용량의 처리를 위한 투수능의 확보가 어려우며, 막힘현상이 쉽게 일어날 가능성이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 높은 투수능을 갖는 친환경 여재를 이용한 토양층 개질을 통하여 높은 투수능을 확보할 필요가 있다. 높은 투수능을 가지면서 오염물질에 대한 선택적 흡착이 가능한 여재를 토양과의 적절한 조합을 위해 본 연구에서는 친환경 여재로서 1) 천연제올라이트(경북 포항산), 2) 퍼라이트, 3) 분갈이용 부식토(mulch), 4) 제강 슬래그, 5) 멀칭용 우드칩(소나무 원목)을 대상으로 실험을 진행하였다.

제올라이트는 질소제거에 이용될 수 있는 여재로서 특히 암모니아성 질소에 대한 이온교환능이 뛰어난 천연제올라이트 자원이 국내에 풍부하다. 토양층에 제올라이트를 함께 주입할 경우, 암모니아성 질소가 지속적으로 이온교환될 수 있으며, 이온교환된 암모니아성 질소는 생물학적 질산화와 토양 내 탈질의 과정을 통해 질소를 제거하는 데 효과적인 역할을 할 수 있다. 이러한 장점 때문에 현재 하수 및 폐수 처리에 제올라이트의 활용이 활발하게 이루어지고 있다(손대희 등, 2004; 장원석 등, 2001; Luanmanee et al., 2002). 화산암의 일종으로 알려져 있는 퍼라이트는 화학적으로 안정하며, 인공적으로 온도를 가해 제조가능하여 다양한 분야에서 적용되는 광물로서, 조 등(2006)의 연구에서는 비점오염 처리를 위해 여과처리장치 개발의 여재로서 기초연구를 수행한 결과 유기물, 질소, 인에 있어 우수한 흡착능을 보였다. 특히 자연상태의 퍼라이트가 일정온도 이상으로 가열되면 퍼라이트 내부구조가 팽창하며 세포형 격자 구조를 가지게 되어 용존성 유기물에 대한 흡착능력을 증대시키는 것으로 알려져 있다(Mathialagan and Viraraghavan, 2002). 부식토(부엽토)는 humus soil 또는 mulch 라 하기도 하는데, 낙엽과 작은 가지 등이 미생물에 의한 생물학적 분해에 의해 생성된 토양을 말하며, 다공성이라 배수가 좋고 수분과 영양분이 풍부한 토양이라 할 수 있다(조진우, 1998). 이러한 기능적 특성과 경제성 등의 이점으로 수처리 분야에 적용가능성이 높으며 특히, 응집제로서의 활용과

질소제거 관련된 연구가 수행된 바 있다(민경석 등, 2002; 조진우, 1998; 고대현 등, 2001). 슬래그는 제철산업에서 부산물로 발생하는 폐기물로서 저렴하게 활용할 수 있는 재료로 건설포장에 재활용되고 있지만, 최근 하폐수 처리를 위한 수처리재로서 특히, 인제거에 이용하는 연구들이 많이 있다(박상숙 등, 2000; 이형술 등, 2001; 김우호 등 2008). 슬래그의 종류로는 크게 선철을 만들 때 발생하는 고로슬래그와 선철을 제강할 때 만들어지는 제강슬래그로 구분할 수 있다. 우드칩은 목재 또는 건축 폐기물로서 연소하기 쉬워 biomass로 활용되고, 토양의 산성화를 막고 탁월한 수분흡수로 뿌리의 호흡작용을 도와 조경용으로 사용되고 있으나, 수처리에서 탈질과정의 탄소원으로 활용 등이 가능하다. 정 등(2007)의 연구에서는 질소, 인 제거 능력 기초 평가를 통해 우드칩과 제올라이트를 혼합하여 수중의 질소와 인을 효과적으로 제거할 수 있다고 하였다.

## 2.2 여재 특성 분석

토양여과는 여과를 기본으로 하는 시스템이기 때문에 적합한 여재 선별이 가장 핵심이 된다고 할 수 있다. 준비된 토양 및 여재들의 물리적 특성 및 화학적 특성을 먼저 분석하였다. 물리적, 화학적 특성분석을 위해 입경분포, 공극률, 비중, 유기물함량, 수분함량, 양이온치환용량과 회분식 흡착실험을 실시하였다. 유효입경( $d_{10}$ )과 균등계수( $U=d_{60}/d_{10}$ )는 표준 체분석 실험(Standard Sieve Test, No. 4, 10, 18, 20, 40, 50, 60, 80, 100, 200, 325)을 통해 측정하였으

며,  $150\mu\text{m}$  이하 크기의 입경은 particle size analyzer (Zetasizer, Malvern, USA)를 사용하여 측정하였다. 미농무성 (United States Department of Agriculture, USDA)에서 제시하고 있는 sand, silt, clay 질량비를 이용하여 토성을 분류하였다(Nemes and Rawls, 2004). 토양과 친환경여재들의 투수계수는 토질시험법 중 실내시험에 의한 투수계수 결정방법 가운데 정수위 투수계수 방법으로 측정하였다. 공극률과 비중은 Bear(1972)의 방법에 따라 측정하였으며, 양이온치환용량(Cation Exchange Capacity, CEC)은 토양 중에 있는  $\text{Na}^+$  을 포화시킨 후 이들을 암모늄이온( $\text{NH}_4^+$ )으로 치환하여 atomic absorption spectrophotometer (Z8200, Hitachi, Japan)를 이용해 측정하였다(Chapman, 1965). 회분식 흡착실험은 토양 및 각 여재들의 입경크기를  $0.425\sim 0.85\ \mu\text{m}$ 로 조절하여 1, 2, 3, 4, 5g 주입하였으며, 흡착실험에서는 인공하천수(TN [ $\text{NH}_4\text{-N}$ ]: 30 mg/L, TP [ $\text{PO}_4\text{-P}$ ]: 2 mg/L)를 제조하여 사용하였으며, 용출실험에서는 증류수를 사용하여 각각 50mL 주입한 뒤, 24시간 동안 120 rpm,  $20^\circ\text{C}$  온도로 흡착실험을 수행하였다. 또한 여재의 표면 비교를 위해 환경주사전자현미경(Philips XL30 ESEM-FEG, FEI) 분석을 실시하였다(Fig. 1).

## 2.3 컬럼 실험

사용되는 각 친환경여재 및 토양의 투수능과 오염물질 제거능을 확인하기 위하여 컬럼실험을 실시하였다. 실험용 컬

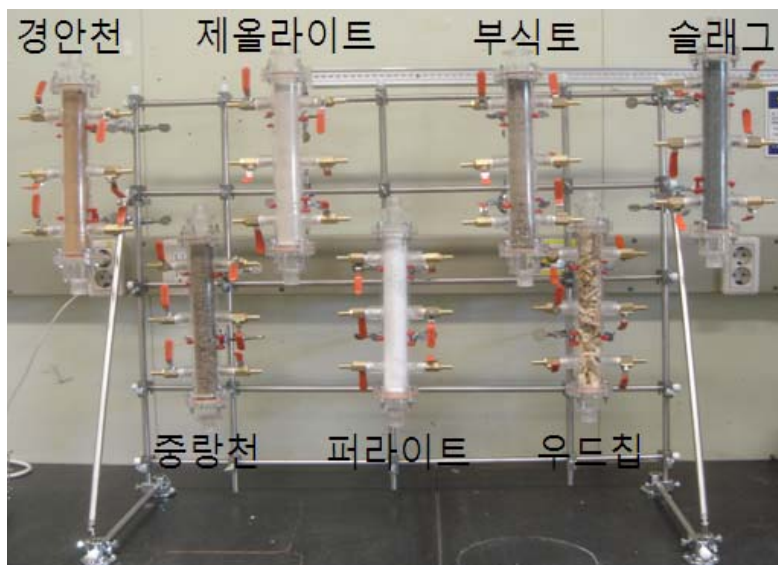


Fig. 1. Schematic of column test for soils and eco-friendly media

림은 직경 5 cm, 길이 30 cm의 아크릴 재질로 제작하였으며(Fig. 2), 우드칩을 제외한 토양과 여재에 대해 동일 입경 크기(0.425~0.85  $\mu\text{m}$ )로 준비하여, 각각의 토양과 여재를 적절한 다짐으로 충전하였다. 유입수는 중랑천 실제 하천수를 이용하여 24 시간 동안 연속실험 하였으며, 유입수 농도는  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P가 각각 16.7, 0.95, 1.63 mg/L 이었다. 유입수의 주입은 컬럼의 아래로부터 위쪽 방향으로 상향류로 하였으며, 유출 선속도는 상수도시설 기준(한국상수도협회, 2004)의 일반 표류수 대상의 완속여과지 여과 속도인 4~5 m/day를 기준으로 5m/day가 되도록 조절하여 실험을 수행하였다.

## 2.4. 분석방법

회분식 실험과 컬럼 실험에서 각각 채취한 수질 시료는 GF/C 여재(pore size: 0.45 $\mu\text{m}$ ) 로 여과 후 분석을 수행하였다.  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P,  $\text{NH}_4^+$ -N의 분석은 Standard methods (APHA, 1998)와 공정시험법에 준하여 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 토양 및 여재의 물리·화학적 특성

토양여과는 기본적으로 하천변 홍수터의 토양을 이용하여 하천수를 처리하는 것으로서 토양의 특성이 제거율과 처

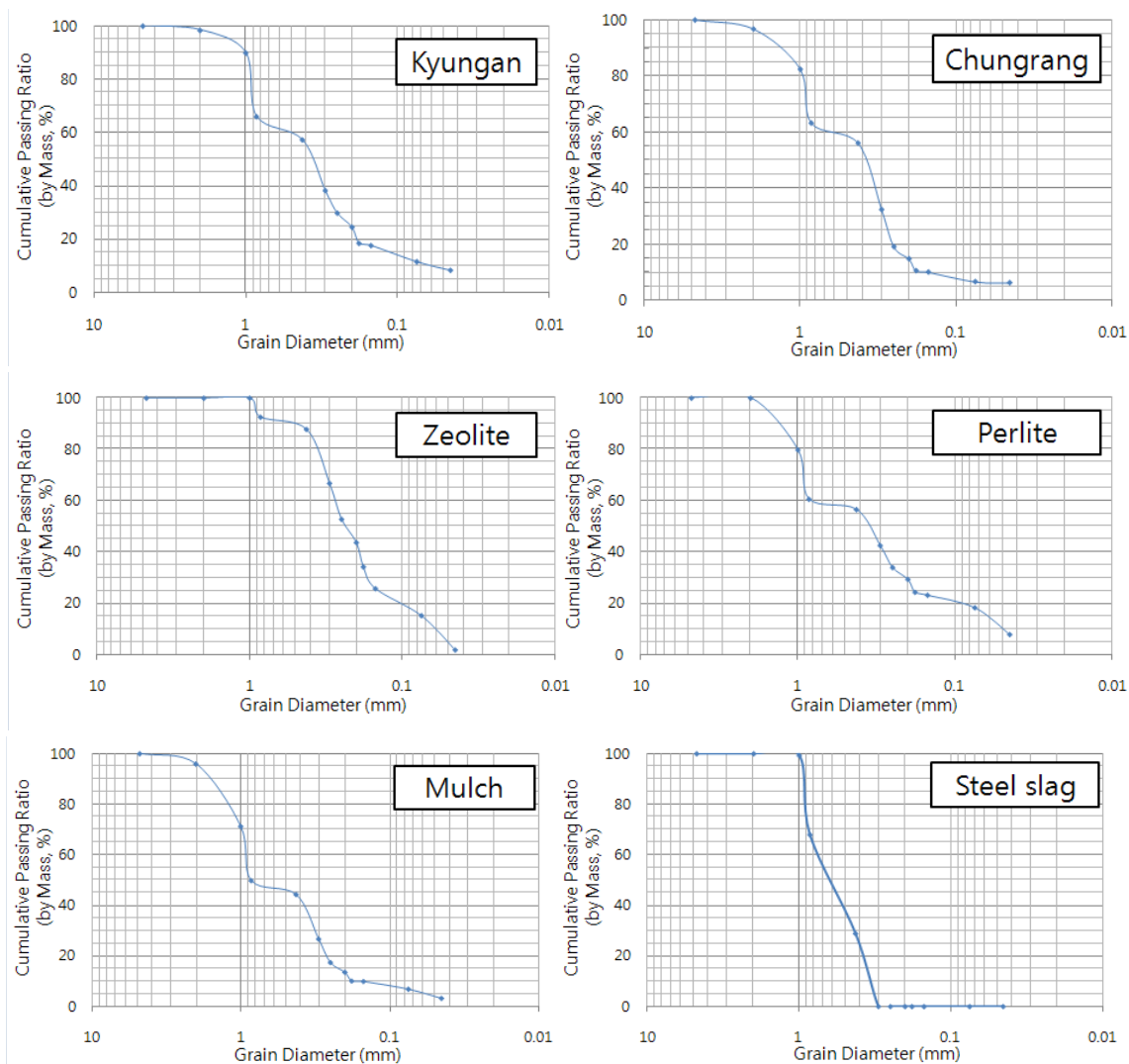


Fig. 2. Grain size distribution of the soil and filter media

리용량을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 본 연구에서는 경안천 및 중랑천 표토층의 토양에 대한 분석을 수행하였으며, 토성분석 결과는 **Table 1**과 같다. 표에서 보듯이 경안천 및 중랑천 토양 모두 50% 이상이 course sand 이상의 입경을 갖는 것으로 나타나, 하천토양의 특성을 보인다. 특히 미 농무성 규정인 USDA (U.S. Department of Agriculture) 방법에 따르면 채취한 토양 모두 사토(sand, 모래: 85~100%, 미사: 0~15%, 점토: 0~10%)에 해당되었다. **Fig. 2**는 두 종류의 토양과 친환경 여재(우드칩 제외)에 대한 누적 입경 분포를 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 두 지역 토양의 입경분포는 매우 유사한 특성을 보이고 있다.

친환경 여재 중에서는 퍼라이트와 부엽토의 입경분포가 넓은데 비하여 제올라이트와 재강슬래그의 입경분포는 좁게 나타나고 있으며, 특히 슬래그의 경우는 입경분포가 0.3~1mm의 매우 좁은 범위에 분포하고 있다. 이는 상업적으로 입경을 조절한 재료를 사용하였기 때문이다. 여재 입경은 투수되는 정도를 나타내는 수리전도도, 즉 투수계수와 연관이 있고, 이는 토양여과 층 내에서 여과속도 및 체류시간 등을 결정하기 때문에 여재의 입경분포를 적절하게 조절하는 것이 토양여과 설계에 중요한 요소 중 하나라고 할 수 있다. 투수계수가 크면 처리할 수 있는 용량의 증가와 막힘현상(clogging) 발생이 늦어질 수는 있겠지만, 흡착에 의한 제거현상을 유도할 만큼의 충분한 접촉시간을 확보하지 못할 수 있으며, 이와 반대로 투수계수가 작을 경우에는 제거효율은 증가할 수 있지만, 처리용량이 줄어들고 막힘현상의 발생이 더욱 빠르게 진행될 수 있는 단점이 있다(Bear, 1972). **Table 2**에서 보는 바와 같이 표토층 토양의 표준체 분석을 통해 토양 특성분석 결과 유효입경이 0.2 내외, 균등계수 4 내외로 유효입경이 0.3~0.45, 균등계수 2 이하인

완속여과사보다 투수능이 떨어져(한국상하수도협회, 2004), 토양여과의 용량증대를 위해서는 일정 깊이를 입경이 큰 여재로 표면개질이 필요할 것으로 판단된다. 이와 비슷하게 토양층을 개량하여 다단토양층법을 오수의 고속처리에 활용한 Wakatsuki 등(1993)의 연구에서는 토양여과의 용량 증대를 목적으로 투수능을 높이기 위하여 토양혼합블록 이외에 5mm 크기의 제올라이트를 투수층의 여재로서 사용하였다. 하지만 사용된 토양혼합블록 및 투수층의 투수능에 대한 정량적인 평가가 이루어지지 않았기 때문에 적용하였던 토양블록 시스템이 어느 정도 효과적인 여과능을 갖는지에 대한 정보는 제공하고 있지 않다. 이에 반하여 본 연구에서 수행한 토양 및 여재들의 투수계수 시험에서는 토양의 경우 투수계수가  $2.85 \times 10^{-3}$ 로 부식토의  $1.18 \times 10^{-2}$ 에 비해서도 1/4 정도 작은 값을 보였으며, 1 내외인 제올라이트와 재강슬래그에 비해서는 거의 1/400 정도의 낮은 값을 보였다. 이는 추후 여과용량의 증대를 위한 토양여과 시스템 제작에서 다른 입경을 갖는 여재들과의 혼합 또는 치환을 통한 입경의 설계가 매우 중요하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

친환경 여재의 경우에는 **Table 2**에서 보듯이 철강석의 정련시 부산물로 나오는 재강슬래그의 비중은 약 3 정도로 다른 여재들에 비해 높았으며, 부식토와 우드칩은 유기물과 함수율 함량이 높아 하천수 처리시 탈질에 필요한 탄소원으로 작용할 수 있을 것이라 생각된다. 한편, 양이온계 오염물질에 대한 흡착능을 대표하는 양이온교환능력(CEC) 측정결과 퍼라이트, 부식토, 제올라이트 순으로 높은 흡착능력을 갖는 것으로 나타났다. 일반적으로 양이온 교환능력이 우수한 제올라이트가 상대적으로 낮은 값을 보인 것은 제올라이트의 입경분포가 다른 여재에 비하여 크기에 따라 표면적이 작았기 때문으로 판단된다. ESEM을 이용한 표면분

**Table 1.** Soil texture analysis of the field soil in Kyungan and Chungrang streamside

Soil texture	Size distribution(mm)	Fraction (Chungrang, %)	Fraction (Kyungan, %)
Very Coarse Sand	2.00~1.00	24.86	30.9
Coarse Sand	1.00~0.50	30.52	27.3
Medium Sand	0.50~0.25	11.59	7.41
Fine Sand	0.25~0.10	15.01	13.16
Very Fine Sand	0.10~0.05	7.88	7.61
Silt	0.05~0.002	9.05	11.73
Clay	< 0.002	1.08	1.89
Note	USDA system	Sand	Sand

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

	Kyungan Soil	Chungrang Soil	Zeolite	Perlite	Mulch	Steel Slag	Woodchip
Effective Size (D <sub>10</sub> )	0.063	0.170	1.800	0.960	0.190	0.340	L x B (1~7cm), D=3mm
Uniformity Coeff. (U)	8.095	3.706	1.583	1.698	4.895	2.265	
Max. Size (mm)	4.75	4.75	6.35	2.00	4.75	2.00	
Min. Size (mm)	0.3x10 <sup>-3</sup>	0.17x10 <sup>-3</sup>	1	0.18	0.8x10 <sup>-5</sup>	4.25x10 <sup>-2</sup>	
Porosity (P)	0.50	0.32	0.55	0.55	0.55	0.44	0.82
Specific Gravity (S)	2.38	2.4	1.78	0.45	1.62	2.94	0.65
Hydraulic Conductivity (K, cm/sec)	2.85 x 10 <sup>-3</sup>	-	1.29	-	1.18 x 10 <sup>-2</sup>	1.17	-
OM* Contents (%)	2.8	2.8	6.6	1.1	26.3	0.0	99.5
Water Contents (%)	13.0	9.4	13.0	0.4	28.8	0.03	30.1
CEC (meq/100g)	4.6	4.4	5.8	31.7	46.0	4.1	4.9

Table 3. Adsorption capacity of the soil and media for nitrogen and phosphorus

		Chungrang Soil	Kyungan Soil	Zeolite	Perlite	Woodchip	Steel Slag	Mulch
Adsorption capacity (mg/kg)	N	93.8	141.4	212.9	86.0	52.5	124.8	257.1
	P	20.8	24.6	19.2	11.8	6.8	60.1	18.1

석 결과는 Fig. 3에서 보듯이 토양의 경우 지역별로 큰 차이 점을 볼 수는 없었으며, 퍼라이트의 경우 고유 표면특성인 격자형 구조를 갖고 있으며, 제올라이트의 경우 표면에 많은 공극을 갖는 다공질 구조로 이루어져 있어 양이온의 흡착에 유리한 구조를 갖는 것으로 보인다.

### 3.2 토양 및 여재의 흡착특성

2개 현장의 자연토양(중랑천, 경안천 토양)과 5개 친환경 여재(zeolite, perlite, mulch, woodchip, slag)에 대하여 용존성 오염물질의 흡착능을 비교 평가하기 위해 흡착실

험을 실시하였다. Table 3은 흡착 실험의 결과를 나타내고 있다. 본 실험에서 실시한 여재 중 질소의 흡착능은 제올라이트와 부식토에서 가장 우수하게 측정이 되었다. 제올라이트의 경우 암모니아성 질소에 대한 흡착능력이 우수하다고 Chen 등(1999)이 보고한 것과 일치하는 결과라 할 수 있다. 또한 제올라이트는 비교적 높은 양이온 교환용량이 있고, 특히 암모니아성 질소에 대한 높은 선택성을 가지고 있기 때문에 흡착능력이 우수한 것으로 알려져 있다(연익준 등, 1999). 인의 제강슬래그에서 가장 높은 흡착능이 있었다. 슬래그의 화학성분은 SiO<sub>2</sub>(20.4%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(38.2%),

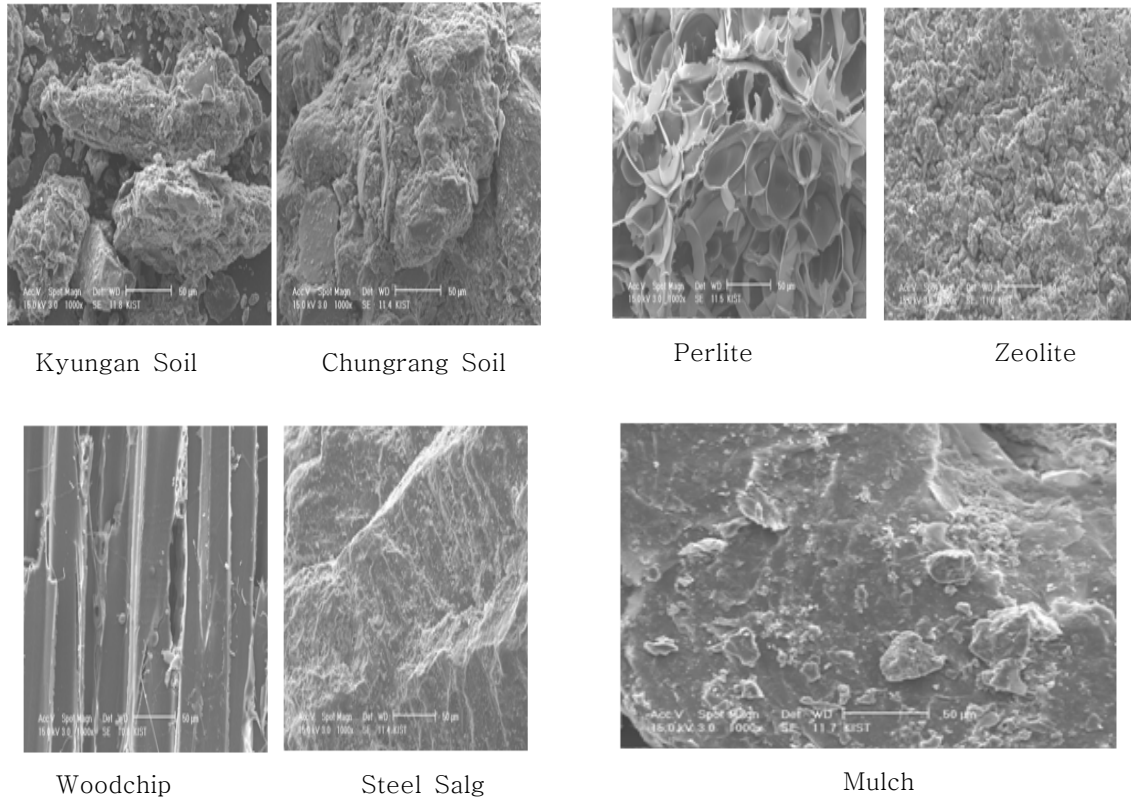


Fig. 3. SEM pictures of the soil and filter media (Magnification: x 1,000)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(9%), CaO(29.6%), MgO(6.3%), K<sub>2</sub>O(0.16%)으로 구성되어 있어(한국건설자재시험연구원, 2007), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Al<sup>-3</sup>, Fe<sup>+3</sup>, Fe<sup>+2</sup> 성분들이 인산이온의 제거에 관여할 것으로 여겨진다. 특히, 철이온의 일부가 유입수의 인산과 반응하여 난용성염을 생성하여 인을 제거할 수 있다는 철부식에 관한 연구결과를 볼 때(박상숙 등, 2000) 인 제거의 가능성이 있음을 알 수 있다.

회분식 실험에서의 흡착실험 후 인공 유입수가 아닌 실제 하천수(중량천)를 대상으로 동일 입경에 대해 연속유입 컬럼실험을 하였으며, 회분식 실험에 사용되었던 중량천, 경안천 토양과 5종류의 친환경 여재에 대한 컬럼 실험 결과는 Fig. 4와 같다. 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)와 인(PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P) 모두 토양에서 제거효율이 높았는데, 특히 질소의 경우는 중량천 토양, 인의 경우는 경안천 토양이 우수하였다. 친환경 여재에서 질소의 제거효율이 인의 경우에 비해 뚜렷하게 높진 않았지만 친환경 여재 중에서는 제올라이트, 부식토가 효율이 좋았다. 질소의 경우 컬럼실험과 회분식 실험

의 결과가 차이가 나는 이유는 유입수의 성상 때문이라고 판단된다. 회분식 실험에서는 인공하천수로 유입수를 제조하였을 때 암모니아성 질소를 질소원으로 모두 사용하였으나, 컬럼실험에서 사용하였던 중량천 실제 하천유입수에서는 암모니아성 질소의 양에 비해 질산성 질소의 비율이 훨씬 컸기 때문에(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N: 16.7 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N: 0.95 mg/L) 짧은 시간 흡착에 의한 제거효율 비교에서 회분식 실험과 컬럼실험의 차이가 나는 것으로 사료된다. 컬럼실험과 회분식 실험에서 유입수의PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>-P농도가 크게 차이가 나지 않았던 인의 경우는 회분식 실험결과와 마찬가지로 슬래그의 인 제거효율이 가장 우수하였다. 시간이 경과할수록 다른 여재들은 모두 질소, 인 모두 제거효율이 떨어지는 반면 제강슬래그의 경우 인의 제거효율이 실험을 진행하는 동안 유지되었다.

전반적으로 회분식 실험과 컬럼 실험 모두 질소와 인의 제거가 자연토양인 경안천 및 중량천 토양에서 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이것은 기본적으로 토양 자체의 질소,



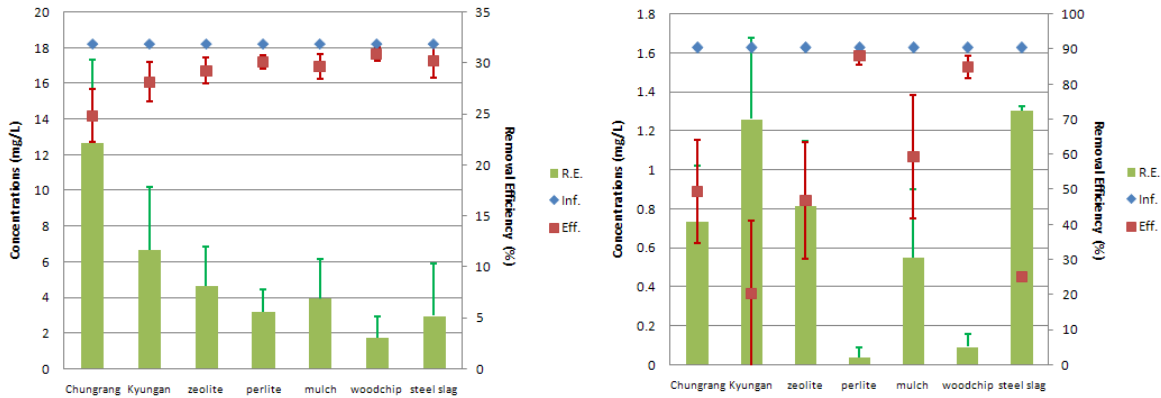


Fig. 4. Influent and effluent concentration, and removal efficiency in nitrogen(a) and phosphorus(b) for the column test (R.E.: removal efficiency, Inf.: influent, Eff.: effluent)

Table 4. Comparison of removal efficiency and hydraulic conductivity between soil, zeolite, steel slag, and mixed soil

		Kyungan Soil	Zeolite	Steel Slag	MS*
Removal Efficiency (%)	Nitrogen	11.7 (±6.1)	8.2 (±3.8)	5.2 (±5.2)	27.8 (±12.1)
	Phosphorous	70.1 (±23.1)	45.4 (±18.4)	72.4 (±1.4)	74.8 (±5.4)
Hydraulic Conductivity (K, cm/sec)		2.85 x 10 <sup>-3</sup>	1.29	1.17	1.30 x 10 <sup>-2</sup>

\* MS (Mixed Soil) : Kyungan Soil + Zeolite + Slag (2.8 : 1 : 1)

인의 제거능력이 우수함을 입증하는 결과라 할 수 있다. 친환경 여재 중에서는 제올라이트, 부식토, 제강슬래그의 제거성능이 우수하였다. 특히 질소의 제거에는 제올라이트, 부식토가 우수하였고, 인 제거에는 제강슬래그가 다른 여재들에 비해 탁월하게 효과가 있음을 확인하였다. 대용량 하천수 정화에 토양층을 개질하여야 한다면, 본 연구에서 선정한 제올라이트, 부식토, 제강슬래그를 선택하여 기능적으로 활용할 수 있을 것이라 사료된다. 특히 하수처리장 방류수 수질기준이 2012년부터 BOD 10 mg/L 에서 5 mg/L로, COD 40 mg/L 에서 20 mg/L 로, TP 2 mg/L 에서 0.2 mg/L 로 대폭 강화된다고 하는 점을 고려할 때(환경부, 2010), 하천수의 처리뿐만 아니라, 하수처리장 방류수를 대상으로 하는 3차 처리에도 친환경 여재들을 이용하여 토양층을 개질하여 토양여과를 수행한다면 대용량의 방류수 처리에도 도움이 될 것이라 생각된다.

### 3.3 토양개질에 따른 효과

토양 개질에 대한 효과를 알아보기 위해 투수계수와 질소

와 인에 대한 처리효율을 컬럼실험을 통해 실험실 내에서 수행하였다. 상기의 토양과 여재의 흡착특성실험을 통해 토양자체의 질소와 인에 대한 제거능이 우수함을 알 수 있었지만, Table 4에서 보는 바와 같이 경안천 토양에서 제올라이트와 제강슬래그에 비해 400배 이상 투수능이 낮음을 알 수 있었다. 투수능을 개선하기 위해 투수능이 좋으면서 질소와 인 제거에 우수하였던 제올라이트와 슬래그를 부피비로 2.8: 1: 1의 비율로 섞어서 컬럼실험을 통해 투수성과 제거효율을 측정하는 결과, Table 4에서 보듯이 개질한 토양의 투수계수는 경안천 토양의 2.85 x 10<sup>-3</sup> cm/sec에서 1.30x10<sup>-2</sup> cm/sec로 증가하여 약 4.6배정도 투수성이 높아지고, 질소와 인의 제거효율 면에서도 각각 11.7 에서 27.8 %, 70.1에서 74.8%로 제거효율을 유지하거나 다소 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 제거대상 물질에 대한 선택적 제거능이 있는 친환경 여재를 적절한 비율로 섞어 개질하여 대용량 하천정화를 위한 토양여과에 이용한다면, 토양여과의 투수능을 증대시키면서도 동시에 수질제거 효율을 유지할 수 있을 것이라 사료된다. 이러한 결과를 바



탕으로 효율적인 토양여과의 용량 증대를 위한 토양과 여재의 개질을 효율화 하기 위해서는 혼합비율의 최적화 등의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하천수질정화를 위한 홍수터 토양여과에서 여과용량증대와 수질개선을 목적으로 토양개질에 필요한 토양 및 친환경 여재들의 기초적인 물리화학적 특성과 흡착특성을 분석하였으며, 친환경 여재를 이용한 토양 개질의 효과를 검토하였다. 본 연구를 통하여 얻은 세부적인 결론은 다음과 같다.

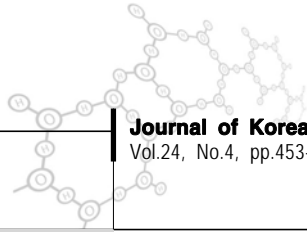
- 1) 하천변 홍수터 자연토양을 직접 채취하여 물리·화학적 특성분석 결과 사토임을 알 수 있었으며 유효입경 0.2 내외, 균등계수 4 내외로 토양만을 대용량의 수질정화를 위해 사용한다면 투수능이 떨어지고 쉽게 막힘현상이 일어날 수 있음을 확인하였다.
- 2) 경안천 토양의 경우 투수계수가 부엽토의 약 25%, 제올라이트 및 제강슬래그의 약 0.25%로 매우 낮아 대용량의 수질개선을 위해서는 보다 입경이 큰 친환경 여재들과 혼합하거나 치환하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 회분식 및 컬럼실험을 통해 자연토양의 질소 및 인에 대한 오염물질 제거능이 기본적으로 우수함을 알 수 있었으며, 친환경 여재 중에서는 질소 제거에 제올라이트와 부식토가 우수하였으며, 특히 인 제거에는 제강슬래그가 다른 여재에 비해 회분식 흡착실험에서 약 3~9배, 컬럼 실험에서 약 2~35배 우수함을 확인하였다.
- 4) 자연토양의 투수성을 개선하기 위하여 친환경 여재 중 제올라이트와 슬래그를 부피비로 각각 2.8, 1, 1의 비율로 혼합하여 투수능 및 질소와 인에 대한 제거능을 비교한 결과, 토양만 사용하였을 경우에 비해 투수능은 약 4.6배, 질소제거 약 2.4배, 인제거 약 1.1배 향상되어 친환경 여재와 혼합을 통한 토양개질이 여과용량 증대와 함께 수질개선도 가능함을 알 수 있었다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(수생태복원사업단) 및 극동건설주식회사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한 본 연구에 필요한 실험용 재료를 제공하여 준 인천선강주식회사에도 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 고대현, 최영균, 정태학 (2001) UR 회분실험을 통한 부식토의 탈질에 대한 영향 평가, **상하수도학회지**, 15(1), 20~27.
- 김응호, 임수빈 (2008) 입상 전로슬래그를 정석재 및 여재로 이용한 인제거와 여과의 동시처리, **한국수처리학회지**, 16(4), pp. 45-54.
- 김호석, 김승현 (2009) 홍수터여과에서 원수공급체계의 설계요소 에 대한 실험연구, **대한환경공학회**, 31(11), pp. 957-964.
- 민경석, 강선홍 (2002) 응집체를 이용한 양돈폐수의 고액분리 증진에 관한 연구, **대한토목학회 논문집**, 22(3-B), 413-419.
- 박상숙, 라덕관, 광해근 (2000) 고로슬래그의 정성반응에 의한 수 중의 인 제거, **한국폐기물학회지**, 17(2), pp. 140-146.
- 손대회, 정윤철, 신정훈, 정진영, 안대회 (2004) 다단토양층을 이 용한 하수처리에 관한 연구, **한국물환경학회지**, 20(3), pp. 215-222.
- 신창민, 최지용, 박철휘 (2004) 도시지역에서의 토지이용별 비점 오염물질 유출특성, **대한환경공학회**, 26(7), pp. 729-735.
- 연익준, 박상찬, 김광렬 (1999) 유연탄 Fly ash로부터 합성한 제올라이트 4A의 암모늄 이온교환특성, **대한위생학회지**, 14(1), 42-53.
- 이형술, 윤태일, 김창균 (2001) ZNR과 URC공정을 이용한 도시하 수의 처리, **대한환경공학회**, 23(8), pp. 1359-1370.
- 장원석, 박대원, 홍석원 (2001) BAF 공법을 이용한 염색폐수 처리 시 제올라이트 매질의 질소제거 효과에 관한 연구, **대한환경 공학회지**, 23(5), pp. 745-755.
- 정영욱, 허상두, 박재우 (2007) 고정화 담체 및 우드칩, 제올라이트를 이용한 질소, 인 제거 능력 평가, **대한상하수도학회 한국 물환경학회 공동추계학술발표회 논문집**, P1106-1109.
- 조강우, 송경근, 안규홍, 김창균, 김태균 (2006) 도시지역의 초기 강우 수질제어를 위한 여과-처리장치 개발, **대한상하수도학 회-한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집**, B134-140.
- 조진우 (1998) 부식토양의 적용에 의한 활성슬러지 공법 개선, 공 학석사학위 논문, 서울대학교, 서울.
- 최명호, 김경수, 김승현 (2009) 우리나라에서 홍수터여과의 가능 성에 대한 기초조사, **대한환경공학회지**, 31(1), 70-78.
- 하현수, 김상태, 김승현, 정종배, 정병룡, 이영득, 엄진섭, 지승환 (2002) 홍수터 여과 모형을 이용한 하천수중의 유기물과 질 소 제거, **한국농화학회지**, 45(2), 84-91.
- 한국전자제시험연구원 (2007) 전기로 산화 슬래그를 이용한 아스 팔트 혼합물 평가 및 현장 적용성 연구.
- 한국상하수도협회 (2004) **상수도 시설 기준**, pp. 362-365.



- 환경부 (2010) 하천 수질개선을 위해 2012년부터 방류수수질기준 대폭강화 보도자료, 2010. 2. 26.
- 환경부 (2004) 자연형 하천수질 정화기술 개발.
- APHA, AWWA and WPCF (1998), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20<sup>th</sup>. Ed., APHA, Washington, D.C..
- Bear, J. (1972) *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, Inc., New York.
- Chapman, H.D. (1965) Cation-exchange capacity, *Agronomy*, 9(2), 891-901.
- Chen, Z. Xing, B., and McGill, W.B. (1999) A unified sorption variable for environmental applications of the Freundlich isotherm, *J. Environ. Qual.*, 28, 1422-1428.
- Chung, J.-B., Kim, S.-H., Jeong, B.-R., and Lee, Y.-D. (2004) Removal of organic matter and nitrogen from river water in a model floodplain. *J. Environ. Qual.* 33, pp. 1017-1023.
- Luanmanee, S., Boonsook, P., Attanandana, T., Saitthiti, B., Panichajakul, C., and Wakatsuki, T. (2002) Effect of intermittent aeration regulation of a multi-soil-layering system on domestic wastewater treatment in Thailand, *Ecol. Eng.*, 18, 415-428.
- Mathialagan, T., and Viraraghavan, T. (2002) Adsorption of cadmium from aqueous solutions by perlite, *J. Hazard. Mat.*, B94, 291-303.
- Nemes, A. and Rawls, W. J. (2004) Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties, *Dev. Soil Sci.*, 30, 47-70.
- Uhl, M. and Dittmer, U. (2005) Constructed wetlands for CSO treatment: an overview of practice and research in Germany, *Water. Science. and Technology.*, 51(9), 23-30.
- Wakatsuki T., Esumi H., and Omura S. (1993) High performance and N&P-removable on-site domestic waste water treatment system by multi-soil-layering method, *Wat. Sci. Tech.*, 27(1), 31-40.