

## 이중층 토양 여과시설을 이용한 도로 강우 유출수 처리성능 평가 (I)

- 시설 설계인자 결정을 중심으로 -

## Performance Evaluation of a Double Layer Biofilter System to Control Urban Road Runoff (I)

- System Design -

조강우<sup>1</sup> · 김태균<sup>1</sup> · 이병하<sup>1,2</sup> · 이슬비<sup>3</sup> · 송경근<sup>1</sup> · 안규홍<sup>1\*</sup>

Kang Woo Cho<sup>1</sup> · Tae Gyun Kim<sup>1</sup> · Byung Ha Lee<sup>1,2</sup> · Seul Bi Lee<sup>3</sup> · Kyung Guen Song<sup>1</sup> · Kyu Hong Ahn<sup>1\*</sup>

1 한국과학기술연구원 환경기술연구단, 2 서울산업대학교 환경공학과, 3 이화여자대학교 환경공학과

(2009년9월10일 접수, 2009년9월28일 수정, 2009년10월5일 채택)

### Abstract

This manuscript covers the results of field investigation and lab-scale experiments to design a double-layered biofilter system to control urban storm runoff. The biofilter system consisted of a coarse soil layer (CSL) for filtration and fine soil layer (FSL) for adsorption and biological degradation. The variations of flow rate and water quality of runoff from a local expressway were monitored for seven storm events. Laboratory column experiments were performed using seven kinds of soil and mulch to maximize pollutants removal. The site mean concentration (SMC) of storm runoff from the drainage area (runoff coefficient: 0.92) was measured to be 203 mg/L for SS, 307 mg/L for TCOD<sub>Cr</sub>, 12.3 mg/L for TN, 7.3 mg/L for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, and 0.79 mg/L for TP, respectively. This study employed a new design concept, to cover the maximum rainfall intensity with one month recurrence interval. Effective storms for last ten years (1998-2007) in seoul suggested the design rainfall intensity to be 8.8 mm/hr Single layer soil column showed the maximum removal rate of pollutants load when the uniformity coefficient of CSL was 1.58 and the silt/clay contents of FSL was virtually 7%. The removal efficiency during operation of double layer soil column was 98% for SS and turbidity, 75% for TCOD<sub>Cr</sub>, 56% for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 87% for TP, and 73-91% for heavy metals. The hydraulic conductivity of the soil column, 0.023 cm/sec, suggested that the surface area of the biofilter system should be about 1% of the drainage area to treat the rainfall intensity of one month recurrence interval.

**Key words** : Design rainfall intensity, Double layer soil filtration, Pilot, Storm runoff

**주제어** : 강우 유출수, 설계 강우강도, 이중층 토양여과, 토양여과, 파일럿

### 1. 서론

국내 물 관리에 있어 비점오염원은 현재 가장 큰 화두가 되고 있는 문제 중 하나이고 4대강 비점오염관리 종합대책

의 2단계에 접어들면서 수계별 비점오염저감시설 설치사업이 유지·관리 단계에 접어드는 등 관련 시장이 지속적으로 확대되고 있는 추세이다. 또한 2011년부터 수질오염 총량관리 항목에 인을 추가시키는 수계별 오염총량관리 기본방

\* Corresponding author Tel:+82-2-958-5832, Fax:+82-2-958-6854, E-mail: khahn@kist.re.kr(Ahn, K.H.)

침이 확정된 것을 포함해 수처리 관련 규제가 강화일로에 있어 고형물, 영양염류 등 비점오염물질의 처리 시설의 설계 및 유지관리에 대한 종합적인 대책이 요구되고 있다. 하지만 비점오염원의 관리에 있어서 가장 문제가 되는 것은 역시 토지 이용, 강우 사상 등 영향인자에 의해 그 배출 특성이 크게 달라진다는 점이다 (신 등, 2004; 김 등 2006). 이러한 배경에서 비점오염 처리시설의 설치 및 유지관리에 대한 매뉴얼들이 보급되고 있는데 (환경부, 2003, 2006; 건설교통부, 2007), 이들은 이미 비점오염물질 처리시설이 상용화된 미국, 유럽의 시설 기준 (DER, 1993)과 크게 다르지 않은 한계점이 있다. 따라서 국내 실정에 맞도록 토양 여재의 구성 및 설계 기준을 마련하는 것이 필요한 상황이다.

한편 다양한 비점오염물질의 처리를 위해 제안되는 여러 가지 방법 중 토양여과기술 (Biofilter 또는 Bioretention)은 경제성과 제거효율 측면에서 우수한 BMP (Best Management Practice)로 최근 큰 관심을 받고 있다 (Cho et al., 2009). 토양 여과기술은 투수성이 양호한 Loamy sand, 자갈, 부식토 등의 자연 여재 내에서의 여과, 흡착 및 미생물 대사 작용에 의해 강우 유출수 내 부유고형물, 총인, 중금속 등에 대해 탁월한 제거효과를 보이는 것으로 알려져 있다 (Song et al., 2007, 2008). 선행 연구들을 통해 토양 특성에 따른 제거 효율 변화 등에 대해 이미 많은 부분 보고되고 있지만 (Hsieh and Davis, 2005), 대부분의 연구가 인공 강우 유출수를 이용한 실험실 규모 연구라는 한계점이 있다. 따라서 유입 수질 및 유량에 변동이 심한 강우 유출수의 특성 상 현장 조건에서의 성능은 큰 차이를 보일 수 있다.

이에 본 연구에서는 국내 실정에 맞는 토양 여과시설을 이용한 도로 강우 유출수 처리 기술의 개발을 위하여 필요한 실험실 규모 연구 및 파일럿 규모 현장 시설의 성능 평가가 이루어졌다. 이러한 일련의 연구의 일환으로 본 논고에서는 현장 시설의 설계에 필요한 설계 요소들을 결정하고 그 특성을 파악함으로써 표준적인 설계 인자 및 절차를 제안하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 설치 대상지역 특성 분석

#### 2.1.1. 대상지역 유출계수 측정

Pilot 시설 설계에 앞서 설치지역의 특성에 맞추어 시설 면적을 결정하기 위하여 서울시 내부 순환로 월곡 램프 (서울시 성북구) 내 설치 대상 지역의 배수면적을 측정된 결과 경사 1.15° 를 보이는 직사각형 도로로 배수면적은 238 m<sup>2</sup> 로 측정되었다. 강우 시 도로에서 발생하는 강우 유출량은

도플러 방식을 이용한 수위 측정기(ISTEC, Korea)와 V-notch를 이용하여 10분 간격으로 측정하였다. 강우강도는 기상청의 자동 관측망 (Automatic Weathering System, AWS)의 동대문구 지점의 자료를 사용하였다. 유출계수는 합리식에 근거하여 60분 동안의 누적강우량과 동일 시간대의 강우 유출량을 이용하여 산출하였다.

#### 2.1.2. 현장 지역 평균 농도 (SMC) 산정

대상지역에서 발생하는 강우 유출수의 유량 및 수질 모니터링은 2007년에 수행되었으며 강우 유출량은 현장 유출계수 산정을 위한 유량측정과 동일한 방법으로 측정하였다. 강우 유출수 시료 채취는 강우시작 초기 1시간은 15분 간격, 이후 2시간은 30분 간격, 이후 5시간은 1시간 간격, 이후 강우 종료까지 2시간 간격으로 하는 것을 기본으로 하였으나 채수 직후 탁도 측정 후 이전 시료와 50% 이상의 차이를 보일 경우에는 채수 간격을 한 단계 짧게 조정하였다.

#### 2.1.3. 설계 강우강도 선정

기존의 빈도 강우 분석은 기상청의 데이터베이스 또는 강우량계에 의한 실측 데이터 중 일강우량에 근거하여 총 강우량에 대해 선정하는 것이 일반적이었다. (이 등 2004). 이러한 방식의 빈도 강우 산출은 강우 유출수 저류조를 설계하거나 저류조와 연계된 처리장치를 설계할 때에는 적용 가능하나 본 연구에서와 같이 저류조와 연계되지 않은 처리시설을 설계할 때에는 다른 방식의 설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 각 유효 강우에 대한 최대 강우강도를 기준으로 빈도 강우강도를 산출하여 이를 근거로 처리 시설의 면적을 결정하였다. 기상청의 데이터베이스 중 1999년에서 2008년 까지의 최근 10년 강우 자료 중 1시간 간격 강우강도를 이용하였는데 USEPA (2002)에 근거하여 6시간의 무강우 기간이 있을 경우 다른 강우사상으로 보았으며 총 강우량이 0.5 mm이상인 강우량 대해서만 분석을 수행하였다.

## 2.2. 이중층 토양여과시설 구성

본 연구에서는 초기 세척 현상이 상대적으로 뚜렷하게 나타나는 도로 강우 유출수의 특성을 고려하여 (이 등, 2006), Fig. 1과 같은 이중층 토양여과시설을 구성하였다. 즉, 유량이 낮고 오염농도가 높은 초기 강우 시 (Fig. 1의 (1))에는 조립질 토양층 (Coarse soil layer) 및 세립질 토양층 (Fine soil layer) 전체를 통해 여과, 흡착, 생물학적 분해를 통한 오염물질의 제거가 이루어져 하부 배수구 (Drain 2)로 유출이 되도록 한다. 반면, 강우가 지속되며 유량이 높고 오염농도가 상대적으로 감소하는 침투 강우시 (Fig. 1의 (2))에는 세립질 토양층의 투수능을 초과하는 유량에 대하여 조립질

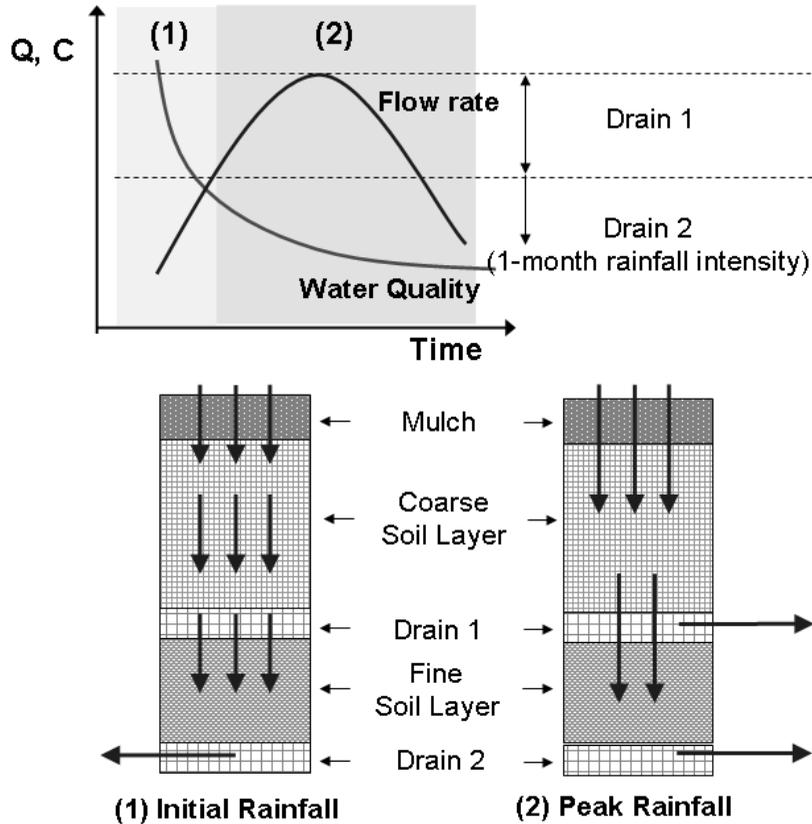


Fig. 1. 이중층 토양여과시설의 운전 개념도

토양층에서 최소한의 여과만을 거치고 상부 유출구 (Drain 1)로 유출될 수 있도록 하여 전체적인 처리 용량을 증대시킬 수 있다 (Cho et al., 2009). 본 시스템의 경우 세립질 토양층을 통과하는 유량이 1개월 빈도의 강우에 해당하는 유출량을 처리할 수 있도록 시설 면적을 결정하였다.

### 2.3. 실험실 규모 토양 여과 컬럼 실험

#### 2.3.1. 토양 특성 분석

실험에 사용한 토양은 총 일곱 종류로 중량천 하천변에서 채취한 자연 토양 (Soil-1, 2), 상업적으로 판매되는 토양 (Soil-3, 4, 5), 그리고 두 종의 완속 여과사 (Soil-6, 7)를 사용하였다. 각 토양의 입경 분포는 7 단계의 표준체 (Nos. 4, 10, 20, 40, 75, 80, 100)를 이용한 체거름 실험을 통해 분석하여 유효입경 (Effective Size,  $d_{10}$ )과 균등계수 (Uniformity Coefficient, U)를 산출하였다. 또한 입경 50  $\mu\text{m}$ 이하 토양의 질량 비율로 정의되는 Silt/Clay 비율은 표준체 분석 후 모든 표준체를 통과한 150  $\mu\text{m}$ 이하의 토양 입자에 대해 입도 분석기 (MasterSizer, Malvern, USA)를 이용하여 산정하였다. 한편 토양 내 함유된 오염물질의 양을 파악

하기 위한 용출 실험으로 10 g의 토양을 50 mL의 증류수에 주입하여 수평 진탕기에서 120 rpm으로 1시간 교반 후 혼합액 내  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ , TN,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 을 측정하였다.

마지막으로 각 토양의 양이온 교환능력 측정 (Cation Exchange Capacity)은 암모늄 치환법을 이용하였는데 여재 1 g을 증류수로 세척한 후 1 M의 아세트산나트륨 ( $\text{NaCOOH}$ )용액을 이용하여 나트륨 이온으로 포화시켰다. 그 후 95%의 에탄올 ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )을 이용하여 여재에 흡착되지 않은 나트륨 이온을 세척하고 다시 1 M의 아세트산암모늄 ( $\text{NH}_4\text{COOH}$ )으로 이온 교환시켜 용출된 나트륨 이온의 농도를 100배 희석 후 원자흡광광도계 (Z-8200, Hitachi, Japan)로 분석하였다.

#### 2.3.2. 단일층 토양 침투 컬럼 운전

현장 시설 설계에 앞서 여러 가지 토양 특성 별 여과능, 흡착능 및 투수능을 비교하여 토양 침투시설의 각 층별 성능을 효율화하기 위한 실험실 규모의 컬럼 실험 (직경 15 cm, 충전 깊이 50 cm)을 수행하였다. 상기 제시한 일곱 종류의 토양에 대한 컬럼 실험에는 인공 강우유출수를 사용하였는

Table 1. 인공 강우유출수의 조성

Pollutants		Value	Constituents
pH		7	HCl or NaOH
SS		200 mg/L	Drainage sediment
SCOD		70 mg/L	CH <sub>3</sub> COONa
TN	Ammonium-N	7 mg N/L	NH <sub>4</sub> Cl
	Nitrate-N	3 mg N/L	NaNO <sub>3</sub>
	Organic-N	2 mg N/L	Glycine
TP		1 mg P/L	Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>
Heavy Metals	Cu	0.1 mg Cu/L	CuSO <sub>4</sub>
	Pb	0.1 mg Pb/L	PbCl <sub>2</sub>
	Zn	0.5 mg Zn/L	ZnCl <sub>2</sub>

테 각 오염물질 별 농도는 본 연구에서 측정한 대상지역의 SMC에 근거하여 Table 1과 같이 조절하여 사용하였다. 먼저 컬럼의 안정화 및 컬럼 내 토양 미생물의 성장을 유도하기 위하여 부유고형물질을 제외한 인공 강우 유출수를 일주일에 6시간 간격으로 약 한 달 동안 순환시켰다 (Cho et al., 2009). 그 이후 토양 내 함유하고 있는 오염 물질이 실험 결과에 주는 영향을 최소화하기 위해 3차 증류수를 24시간 동안 순환시켰다. 인공 강우 유출수는 정량펌프를 이용하여 컬럼으로 이송되었고 각 토양층의 15 cm위에 우회수로를 두어 정수위 하향류 흐름을 유지하였다. 컬럼 운전은 12시간 동안 수행하였고 최하층에 설치된 유출 밸브를 통해 2시간 간격으로 유출수를 채수하고 1 L 메스실린더를 이용하여 유출수의 유량을 측정하였다. 상기 실험은 1주일 간격으로 총 5회 수행하였다.

### 2.3.3. 이중층 토양 침투 컬럼 운전

단일층 토양 침투 컬럼 운전을 통해 조절된 토양층과 세립질 토양층에 각각 적합하다고 판단되는 토양에 대해 각각 50 cm를 충전한 이중층 토양 침투 컬럼 운전을 수행하였다. 실험 수행은 단일층 토양 침투 컬럼 운전과 동일한 방법으로 수행하였고, 다만 각 샘플링 시간 당 조절된 토양층 하부 밸브를 열어 유출수의 수질 및 유량을 측정하였다. 실험은 1주일 간격으로 총 5회 수행하였고 마지막 운전 후 컬럼의 중간 높이에서 채취한 토양시료에 대해 질산화 포텐셜 (Nitrification potential)을 측정하였다. 질산화 포텐셜은 질산화 미생물의 활동량을 대표하는 척도로 일부 이용된 바 있는 개념 (Zhang et al., 2005)으로 측정방법은 다음과 같다. 토양 시료 20 g을 500 mg/L 농도의 NH<sub>4</sub>Cl 용액 100 mL에 혼합한 후 혼합액을 25 ° C의 수평 진탕기에서 하루 동안 배양하고 용존 암모니아성 질소의 농도변화를 측정하

여 다음 식에 의해 계산된다 (Cho et al., 2009).

$$\text{Nitrification Potential} = \frac{N_i - N_t + N_b}{t} \times \left( V + \frac{Mw}{\rho} \right) \times \frac{1}{M(1-w)} \quad (1)$$

여기서  $N_i$ 는 초기 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도 (mg/L),  $N_t$ 는  $t$  시간 배양 후 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도 (mg/L),  $N_b$ 는 대조시료의 배양 후 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도 (mg/L),  $V$ 는 용액의 부피 (L),  $M$ 은 토양 시료의 질량 (kg),  $w$ 는 토양시료의 함수율 (%),  $\rho$ 는 25 ° C에서 물의 밀도 (0.997 kg L<sup>-1</sup>)를 각각 의미한다.

### 2.4. 분석 방법

COD<sub>Cr</sub>, TN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP, SS의 농도는 *Standard Methods*에 의해 측정하였고 질산성 질소는 이온 크로마토그래피 (Dionex, USA), 중금속류는 원자흡광광도계 (Hitachi, Japan)를 이용하여 분석하였다. 탁도는 탁도계 (Hach, USA)를 이용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 강우 유출수 발생 특성

#### 3.1.1. 유출계수 산출

대상지역의 유출계수를 산정하기 위해 수행한 현장 조사 결과 강우강도별 강우유출수 발생량의 관계에 따라 합리식에 근거하여 산정한 유출계수는 0.92이었다. 포장된 도로면에서 일반적인 유출계수는 0.8에서 0.9 사이의 값을 갖는 것으로 보고되는데 (이 등, 2006) 대상 현장에서 이보다 높은 값을 보이는 이유는 상기 지역이 간선도로의 유입 램프

의 일부로 약 1.15도의 경사가 있기 때문인 것으로 보인다.

한편 Fig. 2에서 제시한 바와 같이 강우강도와 강우 유출량과의 상관관계는 결정계수 0.67 정도로 상대적으로 낮은 선형 관계를 보였다. 본 대상지역의 경우 유출계수가 크기 때문에 강우강도의 시간적인 변화에 강우 유출량이 민감하게 변화할 수 있다. 하지만 본 연구에서 강우 유출량은 수위 측정기에 의해 순간적으로 측정된 것에 반해 강우량은 15분 동안의 누적 강우량에 의해 산정되었기 때문에 두 변수간의 관계가 선형에서 벗어날 수 있었고 이는 강우강도가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 관측되었다. 이는 근본적으로 기기의 측정 한계에 기인한 것으로 비점오염 처리시설의 평가에 있어서 적절한 기기의 선정은 중요한 고려 요소가 될 수 있다. (USEPA, 2002).

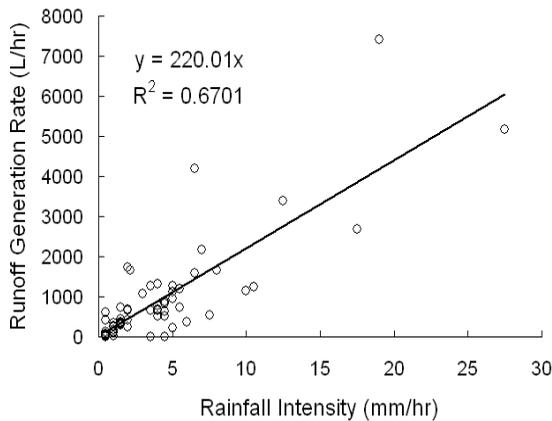


Fig. 2. 강우 유출수 발생량과 강우강도의 상관관계 (실선은 선형 회귀직선을 나타냄)

### 3.1.2. 지역 평균 오염농도 (SMC) 산정

비점오염물질 처리 시설은 일반적으로 강우강도, 선행 무강우일수, 토지 이용 등 다양한 영향인자에 의해서 크게 변화하는 강우 유출수의 유량 또는 수질 변화에 의해 그 제거효율이 크게 좌우될 수 있다 (조 등, 2007). 하지만 본 연구의 목적은 다양한 토양 종류에 대해 동일한 조건에서 여과, 흡착, 및 생물학적 분해를 통한 오염물질 제거능의 객관적인 비교를 주목적으로 하고 있는 만큼 본문에서는 시간에 따른 강우 유출수의 농도 및 유량의 변화는 제시하지 않았다. 총 7회에 걸친 현장조사에 의한 각 강우별 EMC 및 SMC를 산정한 결과는 Table 2에 제시한 바와 같다 (Song et al., 2007). EMC의 경우 SS는 46~458 mg/L, TCOD<sub>Cr</sub>는 95~495 mg/L, TN은 5.69~19.57 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 0.2~14.2 mg/L, TP는 0.24~1.36 mg/L의 농도 범위를 나타내었다.

### 3.1.3. 설계 강우강도 선정

국내외의 일반적인 비점오염 처리시설에 대한 권고 기준에서는 (DER, 1993) 설계 누적 강우량을 기준으로 처리시설의 면적을 결정하도록 하고 있다. 예를 들어 건설교통부 (2007)에서는 해당 지역의 80% 강우사상 확률에 해당하는 강우량으로서 누적 유출고로 환산하여 최소 7.4 mm 이상을 처리할 것을 권고하고 있고 환경부 (2006)에서는 최소 5 mm 이상의 누적 강우량을 처리할 수 있도록 규정하고 있다. 하지만 이는 토양 내 공극에 강우 유출수를 저류하는 침투형 시설이나 여과형 시설의 경우에도 설계 강우량에 해당하는 저류지와 연계되었을 경우 적용 가능하다. 하지만 인구밀도가 높은 도심지의 경우에는 경우에 따라 여재층과 동일한 부지를 차지하는 저류지와 연계 운영하기가 곤란하고, 하절기 짧은 간격으로 강우가 반복되는 국내 특성 상 저류된 강우

Table 2. 대상지역 강우 유출수의 강우사상 평균농도와 지역평균농도 (Song et al., 2007)

Date	Jun. 14.	Jul. 10.	Oct. 22.	Nov.13.	Nov.27.	Dec. 18	SMC
SS (mg/L)	265	118	128	N.A. <sup>a</sup>	46	458	<b>203</b>
TCOD (mg/L)	382	217	492	162	95	495	<b>307</b>
TN (mg/L)	8.40	6.02	19.57	14.86	5.69	19.40	<b>12.3</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(mg/L)	0.20	N.A.	6.64	11.29	4.07	14.22	<b>7.3</b>
TP (mg/L)	1.10	0.43	1.03	0.60	0.24	1.36	<b>0.79</b>
Rainfall Amount (mm)	63.0	19.0	21.5	3.0	12.0	2.5	-
ADDs <sup>b</sup> (days)	2	0	2	3	5	5	

<sup>a</sup> N.A. : Not Analyzed, <sup>b</sup> ADDs: Antecedent Dry Days

Table 3. 서울 지역의 최근 10년 유효강우 횟수

Year	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Event	44	43	38	51	54	37	51	44	65	54

Table 4. 실험실 규모 토양 컬럼시험에 사용된 토양의 물리·화학적 특성 (Cho et al., 2009).

ID	$d_{10}^a$ (mm)	$U^b$	Silt/Clay Content (%)	$COD_{Cr}$ (mg/kg)	TN (mg/kg)	$NH_4^+-N$ (mg/kg)	CEC (meq/100 g)
Soil-1	0.15	4.55	10.1	34.0	14.9	3.1	5.25
Soil-2	0.30	4.72	9.2	67.8	13.6	2.4	6.13
Soil-3	0.16	2.22	7.2	N.D. <sup>c</sup>	7.0	5.5	1.98
Soil-4	0.25	2.59	3.6	20.0	4.0	9.5	2.77
Soil-5	0.28	2.53	2.2	N.D.	2.4	3.7	2.13
Soil-6	0.35	1.84	2.1	N.D.	N.D.	N.D.	2.01
Soil-7	0.33	1.58	0.7	N.D.	5.5	4.2	2.76
Mulch	0.31	3.71		2110.0	51.4	28.5	46.0

<sup>a</sup> $d_{10}$ : effective size, <sup>b</sup> $U$ : uniformity coefficient, <sup>c</sup>N.D.: Not Detected

유출수가 모두 침투되기 전에 다음 강우가 발생할 가능성이 있다.

상기의 사항을 고려하여 본 연구에서는 저류지와 연계하지 않은 시설의 운영을 위해 설계 강우 강도를 기준으로 시설의 면적을 결정하였다. 이를 위해 서울지역에 최근 10년(1998년~2007년) 간의 총 481개의 유효강우에 대하여 (Table 3) 최대 강우 강도의 누적확률분포를 산출하였다 (Fig. 3). 이를 바탕으로 1개월 빈도 (누적확률 75.1%)의 최대 강우강도는 8.8 mm/hr로 산정되었다. 본 연구의 설계 방식을 적용할 경우에는 1개월 빈도로 발생하는 강우 유출수의 전량을 처리할 수 있는 특징이 있다.

### 3.2. 토양 특성별 오염물질 제거효율 평가

#### 3.2.1. 토양 특성 분석 결과

토양의 입경 분포 및 화학적 특성은 Table 4에 제시한 바와 같다 (Cho et al., 2009). 각 토양은 미 농림성 (USDA)의 기준 상 Sand 또는 Sandy Loam에 해당하였고 균등계수는 1.58에서 4.72, Silt/Clay 비율은 2.1에서 10.1% 범위에 있었다. 일반적으로 토양의 유효입경 및 균등계수는 투수성 및 여과 효율을 결정하는 반면 Silt/Clay 비율은 용존성 오염물질에 대한 흡착능에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Hsieh and Davis, 2005, Cho et al., 2009).

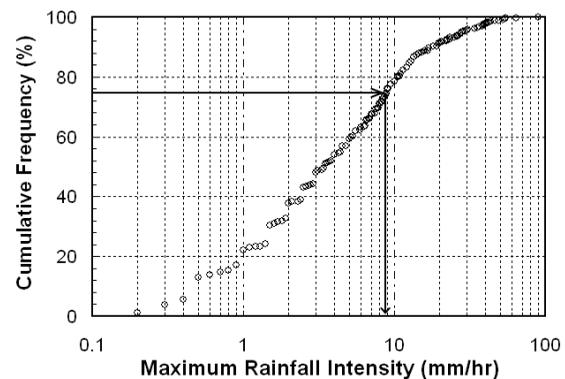


Fig. 3. 서울지역의 10년간 유효 강우의 최대 강우강도에 대한 누적확률분포곡선

본 연구의 결과에서도 Silt/Clay 비율과 양이온 교환능력 간에 양의 상관관계 (상관계수: 0.76) 가 있는 것으로 나타났다. 특히 부식도는 다른 토양에 비해 월등히 큰 양이온 교환능력을 보였는데, 부식도는 다량의 휴믹 성분을 포함하고 있고 이들의 구조에 양이온 흡착이 가능한 작용기 (Functional Group)가 다수 포함되어 있는 것으로 알려져 있다 (Jang et al., 2005).

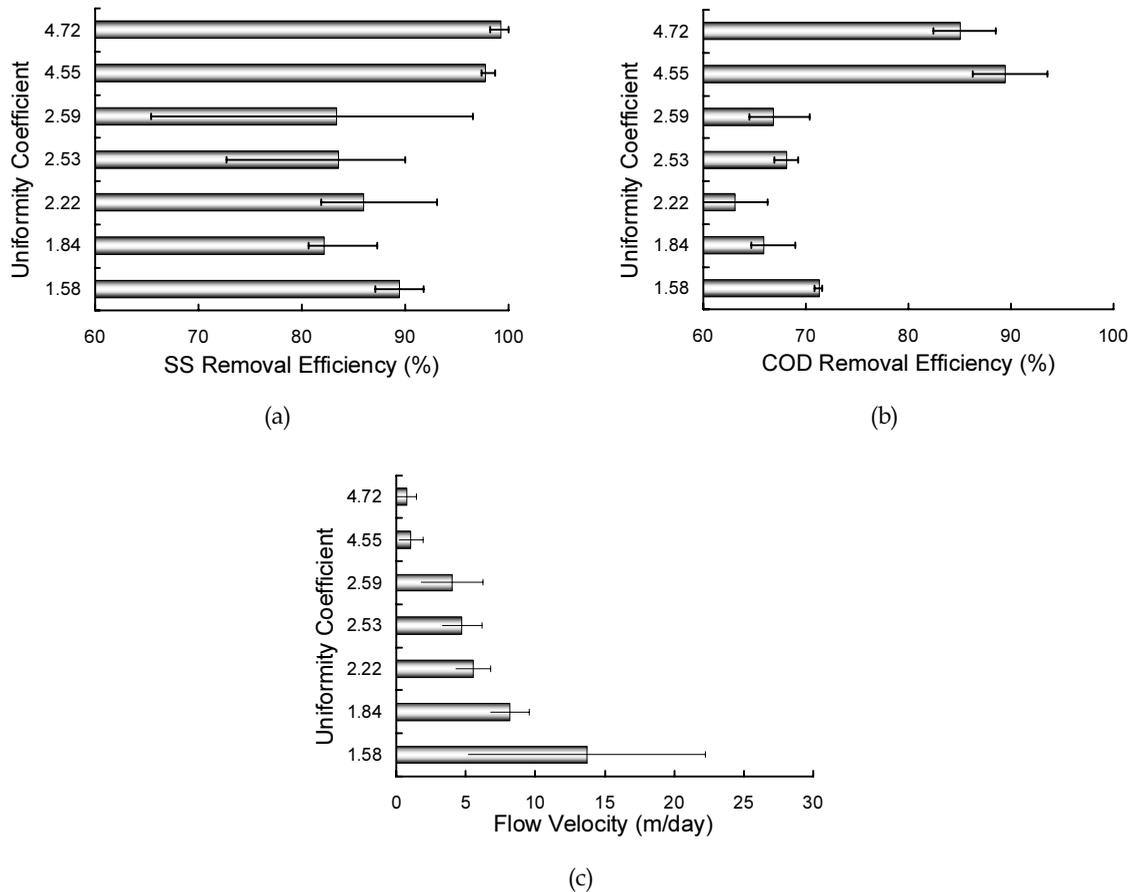


Fig. 4. 실험실 규모의 단일층 토양 컬럼 실험에서 균등 계수에 따른 TCOD<sub>C</sub>, SS 제거효율 및 선속도 변화

### 3.2.2. 토양 종류 별 오염물질 제거능 비교 평가

먼저, 토양 입경에 따른 SS와 TCOD<sub>C</sub>의 제거효율을 살펴 보면 Fig. 4에 제시한 바와 마찬가지로 균등계수 3~4를 기준으로 유의한 차이를 관측할 수 있었다. 즉 균등계수가 4 이상일 때 SS 제거율은 95% 이상으로 나타났고 그 이하의 균등계수에서는 큰 차이를 보이지 않고 80~85%의 제거율이 관측되었다. 하지만 Fig. 4(c)에 제시한 바와 같이 균등계수가 증가할수록 여재 내 선속도가 꾸준히 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 여과를 통한 오염 부하 제거를 목적으로 하는 조립질 토양층에는 투수계수가 가장 크며 고품질의 제거율에 있어서도 크게 떨어지지 않는 균등 계수 1.58의 토양이 가장 적합한 것으로 판단되었다. 이미 토양 침투 시설을 이용한 강우 유출수 처리가 상용화된 미국, 호주 등에서의 일반적인 설계 기준에 있어서도 (Hsieh and Davis, 2005) 투수성이 빠른 Sandy loam 계열의 토양을 권고하고 있다 (DER, 1993).

한편 용존성 오염물질에 대한 흡착 및 생물학적 분해를

목적으로 한 세립질 토양층의 조성을 결정하기 위한 실험 결과는 Fig. 5에 제시하였는데, 토양의 Silt/Clay 비율이 클수록 암모니아성 질소에 대한 흡착능이 증가하는 것으로 관측되었다. 또한 생물학적 분해능에 대한 지표로서 질산화 포텐셜을 측정된 결과 역시 암모니아성 질소에 대한 흡착능과 동일한 경향을 확인하였다. 비표면적이 큰 실트 및 점토의 비율이 클수록 질산화 미생물의 성장에 필요한 암모니아성 질소의 흡착 뿐만 아니라 토양 미생물의 부착 및 성장에 유리한 것으로 알려져 있다. (Song et al., 2008; Cho et al., 2009). 하지만 앞서 언급한 것과 마찬가지로 Silt/Clay 비율이 7% 이상일 때에는 균등계수가 3 이상이 되어 토양 내 선속도가 한 차수 이상 감소하는 것으로 나타나 세립질 토양층의 조성은 Silt/Clay 비율 기준으로 7% 내외로 조절하는 것이 적합하다고 볼 수 있었다.

### 3.2.3. 이중층 토양 컬럼에서의 오염물질 제거능 평가

단일층 토양 여과 컬럼 시험 결과를 바탕으로 구성한 이중

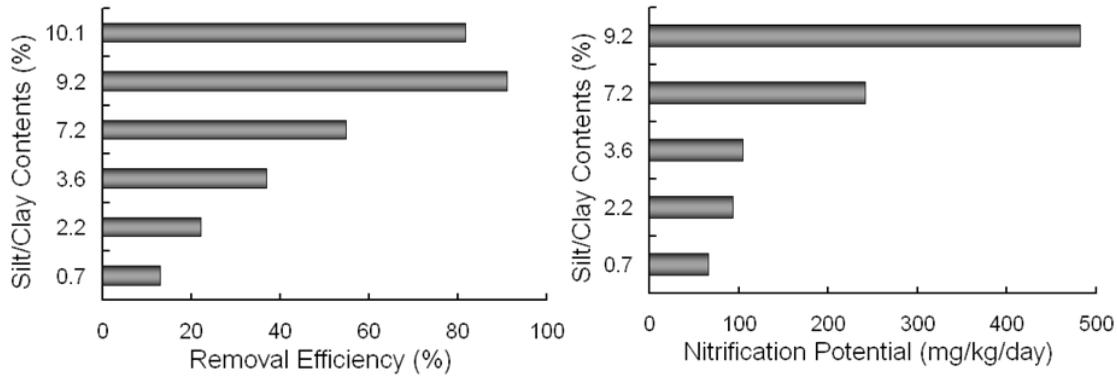


Fig. 5. 실험실 규모의 단일층 토양 컬럼 실험에서 Silt/Clay 비율에 따른 암모니아성 질소 제거율과 질산화 포텐셜 변화

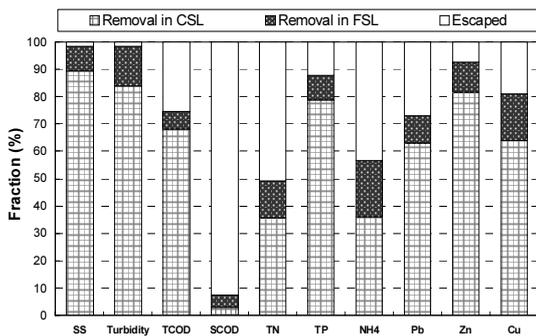


Fig. 6. 실험실 규모의 이중층 토양 컬럼 실험에서 토양층 별 오염물질 제거효율

층 토양 여과 컬럼의 운전결과는 Fig. 6에 제시한 바와 같다. 실험 결과 SS 및 탁도 98%, TCOD<sub>G</sub> 75%, 암모니아성 질소 56%, 총인 87%, 중금속류 73~91%의 탁월한 제거효과를 확인하였다. 상기 결과는 국내의 비점오염 처리시설의 제거율 권고기준 (건설교통부, 2007)을 만족할 뿐 아니라 기존의 유사 연구에서 보고된 결과 (Hsieh and Davis, 2005) 보다 우수한 것으로 나타났다. 대부분의 고형물질은 조립질 토양층에서 제거되는 것으로 나타났고 이에 따라 대부분 입자에 포획된 상태로 발생하는 것으로 알려진 (김 과 이, 2005; Tuccillo, 2006) 총인, 중금속류의 제거에 있어서도 조립질 토양층이 중요한 역할을 하였다. 반면 수용성 물질인 암모니아성 질소는 조립질 토양층과 세립질 토양층에서 거의 동일한 양이 제거되었다. 유출수 수질은 SS 3 mg/L, TCOD<sub>G</sub> 22 mg/L, 암모니아성 질소 1.49 mg/L로 나타나 분석 수질항목에 대하여 공공하수처리시설의 방류수 수질 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

한편 다른 오염물질과는 달리 질산성 질소의 경우에는 운전 기간동안에 유입수의 최대 2~3배 이상 높게 나타났다. 이러한 질산성 질소의 유출 현상에 대해서는 최근의 선행연구에서 잘 설명하고 있다 (Cho et al., 2009). 질산성 질소는 대부분 토양층 내의 미생물의 탈질작용에 의해 제거될 수밖에 없는데 토양층 내에서는 전자공여체 역할을 할 수 있는 물질이 적기 때문에 생물학적인 탈질반응이 충분히 일어날 수 있는 환경이 아닐 것이다. 따라서 이전 실험에서 토양이 머금고 있던 암모니아성 질소의 질산화를 통해 생성된 질산성 질소가 운전 기간 동안 높은 농도로 유출되는 것으로 보이고 선행 연구자들 역시 질산성 질소에 대한 낮은 제거효율을 보고한 바 있다 (Hsieh and Davis, 2005). 탈질반응을 통한 질산성질소의 제거를 촉진하기 위해서 Kim et al. (2003)은 황이나 유기물 등의 전자공여체를 함유하고 있는 탈질층을 토양층 하부에 설치하는 것을 제안한 바 있고 이러한 방법들에 대한 응용을 통해 질산성 질소에 대한 제거효율을 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

### 3.3. Pilot 규모 토양 여과 시설 면적 결정

상기의 이중층 토양 컬럼에서의 수리 전도도를 측정한 결과 약 0.023 cm/sec로 나타났고, 모사 강우 6시간 동안 유입된 양은 평균적으로 12 L/hr에 해당하였다. 하지만 상기 유입량은 토양의 공극 및 상부 물고임에 의해 체류 (retention)되는 양을 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 토양 여과시설의 면적을 토양층의 수리전도도 및 합리식에 근거하여 다음과 같이 계산하였다.

$$A = \frac{L}{Kh} \times CIA_D \times \frac{1}{36000} \quad (2)$$

여기서,  $A$ 는 토양 여과시설의 면적 ( $m^2$ ),  $L$ 은 토양 층진 깊이 (1 m),  $h$ 는 수두차(m),  $K$ 는 수리전도도 (cm/sec),  $C$ 는 유출계수,  $I$ 는 강우 강도 (mm/hr),  $A_d$ 는 배수면적 ( $238 m^2$ )을 의미한다. 유출구에서의 수두 (hydraulic head)는 무시하여 수두차는 1.15 m로 산정하여, 대상지역의 1개월 빈도 최대 강우강도인 8.8 mm/hr에 해당하는 강우 유출수 발생량 (1335.7 L/hr)을 처리할 수 있는 면적은 약  $2 m^2$ 으로 계산되었다. 이는 대상 배수면적의 약 1%에 해당하는 면적으로 기존의 문헌 (Hsieh and Davis, 2005)에서 보고되는 4~5% 보다 작은 값이다. 즉, 본 연구의 결과에서 뒷받침 되듯이 토양으로의 침투속도와 오염물질 제거 효율을 동시에 개선하기 위해서 토양의 유효입경과 균등계수를 적절히 조절하는 것이 주요한 고려인자라고 할 수 있다. 이상의 결과를 바탕으로 이중층으로 구성된 파일럿 규모의 토양 여과시설을 서울시 내부순환로 월곡램프 하부에 설치하여 2008년 10월부터 현재까지 운전 중에 있다. 시설 운전 에 따른 강우 유출수 내 오염물질 제거 효율, 각 수질 항목 별 제거 특성, 장기 운전 에 따른 거동 변화 등은 본 연구의 두 번째 논고에서 다룰 예정이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 조립질 토양층 (Coarse Soil Layer)과 세립질 토양층 (Fine Soil Layer)로 구성된 이중층 토양 여과 시설 설계를 위한 현장 조사와 실험실 규모의 결과를 다루고 있고 세부적으로는 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1. 총 7회에 걸친 대상지역 (서울시 내부순환로 월곡램프)에 대한 현장조사 결과 유출계수는 0.92, 지역평균농도 (SMC)는 SS는 203 mg/L, TCOD<sub>Cr</sub>은 307 mg/L, TN은 12.3 mg/L, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 7.3 mg/L, TP는 0.79 mg/L로 측정되었다.

2. 본 연구의 토양 여과시설의 경우 전체 하부의 세립질 토양층을 통과하는 유량이 1개월 빈도의 강우에 해당하는 유출량을 처리할 수 있도록 하였고, 이에 서울지역에 최근 10년 (1998년 ~ 2007년)간의 총 481개의 유효강우에 대해 분석한 결과 1개월 빈도 (누적확률 75.1%)의 최대 강우 강도는 8.8 mm/hr로 산정되었다.

3. 총 7종의 토양에 대해 입경에 따른 SS와 TCOD<sub>Cr</sub>의 제거효율을 평가한 결과 균등계수 3~4를 기준으로 유의한 차이를 관측할 수 있었다. 하지만 여과를 통한 오염 부하 저감량을 극대화하는 조립질 토양층에는 균등 계수 1.58의

토양이 가장 적합한 것으로 판단되었다. 한편, 토양의 Silt/Clay 비율이 클수록 용존 오염물질에 대한 흡착능 및 생물학적 분해능이 증가하는 것으로 나타나 세립질 토양층의 조성은 Silt/Clay 비율 기준으로 7% 내외로 조절하는 것이 적합하다고 보였다.

4. 이중층 토양 컬럼의 운전 결과 SS 및 탁도 98%, TCOD<sub>Cr</sub> 75%, 암모니아성 질소 56%, 총인 87%, 중금속류 73~91%의 우수한 제거효과를 확인하였다. 대부분의 고형 물질은 조립질 토양층에서 제거되는 것으로 나타났고 암모니아성 질소는 조립질 토양층과 세립질 토양층에서 거의 동일한 양이 제거되었다.

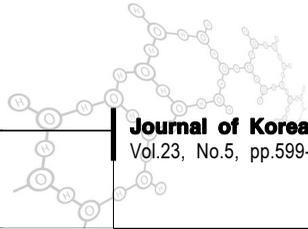
5. 이중층 토양 컬럼의 수리 전도도 (0.023 cm/sec)를 바탕으로 대상지역의 1개월 빈도 최대 강우강도 (8.8 mm/hr)를 처리할 수 있는 면적은 대상 배수면적의 약 1%에 해당하는  $2 m^2$ 으로 계산되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원(KIST) 기관고유사업의 지원에 의하여 수행되었음

#### 참고문헌

1. 건설교통부 (2007) **환경친화적 도로유지관리 잠정지침**, pp.46-68, 건설교통부, 서울.
2. 김이형, 이선하 (2005) 주차장 및 교량 강우유출수의 중금속 오염물질 특성과 동적 EMC, **한국물환경학회지**, 21(4), pp.385-392.
3. 김이형, 이은주, 고석오, 강희만 (2006) 아스팔트 포장 고속도로의 강우 지속시간별 오염물질 유출 경향, **한국도로학회 논문집**, 8(1), pp.99-106.
4. 신창민, 최지용, 박철휘 (2004) 도시지역에서의 토지이용별 비점오염물질 유출 특성, **대한환경공학회지**, 26(7), pp.729-735.
5. 이두진, 윤현식, 선상운,곽수동, 이동훈 (2004) 강우유출 모델을 이용한 합류식 하수관거 월류수 저류시설의 용량결정에 관한 연구(II) - 저류조 설계를 중심으로, **대한환경공학회지**, 26(3), pp.370-380.
6. 이은주, 고석오, 강희만, 이주광, 이병식, 임경호, 김이형 (2006) 포장지역에서의 강우사상별 EMC 산정 및 단순 샘플 농도와의 비교, **한국물환경학회지**, 22(1), pp.104-109.
7. 조강우, 송경근, 김창균, 김태균, 안규홍 (2007) 비점오염원



- 관리 전략 수립을 위한 Bioretention 연구, **한국물환경학회대 한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집**, pp.415-420.
8. 환경부 (2006) **비점오염원관리 업무편람**, pp.56-73, 환경부, 서울.
  9. 환경부 (2003) **비점오염관리를 위한 강우유출수 관리 매뉴얼**, pp.165-198, 환경부, 서울.
  10. Cho, K.W., Song, K.G., Cho, J.W., Kim, T.G., and Ahn, K.H. (2009) Removal of nitrogen by a layered soil infiltration system during intermittent storm events, **Chemosphere**, **76**, pp.690-696.
  11. Department of Environmental Resources (1993) **Design Manual for Use of Bioretention in Stormwater Management**, Prince George's County (Md.) Government, Prince George's County.
  12. Hsieh, C. and Davis, A.P. (2005) Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff, **J. Environ. Eng.-ASCE**, **131**(11), pp.1521-1531.
  13. Jang, A., Seo, Y.W., and Bishop, L. (2005) The removal of heavy metals in urban runoff by sorption on mulch, **Environ. Pollut.**, **133**, pp. 117-127.
  14. Kim, H., Seagren, E.A., and Davis A.P. (2003) Engineered bioretention for removal of nitrate from stormwater runoff, **Water Environ. Res.**, **75**, pp.355-367.
  15. Song, K.G., Cho, K.W., and Ahn, K.H. (2007) A comprehensive study on bioretention for urban storm runoff management in Korea, **Proceedings of 4th IWA specialist conference on efficient use and management of urban water supply-Efficient 2007**, pp.689-698.
  16. Song, K.G., Cho, K.W., Cho, J.W., Kim, T.G., and Ahn, K.H. (2008) The fate of nitrogen in bioretention as a novel practice to control storm runoff, **Proceedings of 8th IWA specialized conference of small water and wastewater systems and 2nd IWA specialized conference on decentralized water and wastewater international network**, pp.184-187.
  17. Tuccillo, M.E. (2006) Size Fractionation of Metals in Runoff from Residential and Highway Storm Sewers, **Sci. Tot. Environ.**, **355**, pp.288-300.
  18. U.S. Environmental Protection Agency (2002) **Urban Stormwater BMP Performance Monitoring**, pp.4-44, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.
  19. Zhang, J., Huang, X., Liu, C., Shi, H., and Hu, H. (2005) Nitrogen removal enhanced by intermittent operation in a subsurface wastewater infiltration system, **Ecol. Eng.**, **25**, pp.419-428.