

우리나라에서 홍수터여과의 가능성에 대한 기초조사

최명호 · 김경수 · 김승현[†]

영남대학교 환경공학과

(2008년 11월 24일 접수, 2009년 1월 21일 채택)

A Primary Study on the Potential of Floodplain Filtration in Korea

Myung-Ho Choi · Kyeong-Soo Kim · Seung-Hyun Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

ABSTRACT : Floodplain areas of major South Korean rivers were determined by analyzing topographical maps and hydraulic properties of floodplain soil were measured using disc tension infiltrometer. To assess the possibility of treating secondary effluents of municipal wastewater with floodplain soil, a computer code for the analysis of unsaturated flow in soil was employed along with searches conducted in the literature. Based on the data generated, an estimate of total floodplain filtration capacity in Korea was obtained. The results of our study reveal that Korean floodplains have surface soil that is adequate for treating water. Moreover, the distributions of floodplains are substantial over the entire reaches of the rivers, indicating that the conditions are favorable for floodplain filtration as additional treatment of secondary effluent. The capacity of floodplain filtration in Korea is circa 182,000,000 m³/day and most of the rivers are estimated to have enough capacity of floodplain filtration to meet all the secondary effluent, indicating that this technology may be expected to make further improvements on river water quality. Furthermore, this method may also be applied to better the source-water quality for drinking water.

Key Words : Floodplain Filtration, Floodplain Area, Infiltration Rate, Treatment Capacity, River Water Quality

요약 : 지형도를 이용하여 전국 주요하천의 홍수터 면적을 조사하였고, 원관형 부압침투계를 이용하여 홍수터 토양의 투수특성을 조사하였다. 문헌조사와 불포화 흐름해석용 코드를 이용하여 홍수터에서 도시하수의 2차 처리수에 대한 토양처리의 가능성도 평가하였다. 이들 자료를 바탕으로 우리나라의 홍수터여과 용량을 산정하였다. 연구결과 우리나라의 홍수터는 토양여과에 적합한 표층토를 가지며, 하천연장 전체에 걸쳐 홍수터가 골고루 분포되어 있어서 홍수터여과가 하수의 추가처리로 활용되기에 유리한 여건임을 알 수 있었다. 우리나라 전체의 홍수터여과 용량은 약 182,000,000 m³/day이고, 대부분의 하천들은 2차 처리수를 모두 홍수터여과를 통해 추가적으로 처리할 수 있을 것으로 계산되어 이 공법을 적용할 경우 하천수질이 개선 될 것이라고 기대한다. 또한, 본 공법은 상수원수의 수질개선에도 활용될 수 있을 것으로 기대되었다.

주제어 : 홍수터여과, 홍수터면적, 침투율, 처리용량, 하천수질

1. 서론

여러 가지 규제와 환경기초시설에 대한 활발한 투자에 힘입어 우리나라의 하천수질은 많이 개선되었으나 아직 만족스런 수준은 아니어서(수질측정자료/물환경정보시스템, 환경부, 2007) 이에 대한 지속적인 노력이 필요하다 할 것이다. 하천수질을 더욱 개선하기 위한 방안으로 기존의 여러 대책에 더하여 하천수를 직접 처리하는 공법들이 개발되었으며, 오염된 하천의 바닥이나 하안에 미생물이 부착할 수 있는 인공담체를 배치하거나 오염된 하천수를 고수부지로 끌어내어 인위적인 방법으로 처리한 후 이를 다시 하천에 유입시키는 방식이 주를 이룬다고 할 수 있다. 그러나 이러한 공법들은 큰 하상계수로 표시되는 우리나라

하천의 불리한 특성을 극복하기 어려워 아직까지 그 효용성이 널리 인정받고 있지 못하는 실정이다.

우리나라와 같이 하상계수가 큰 하천에는 층적층이 발달하고, 이는 보통 양호한 투수성과 함께 탁월한 물리적, 화학적, 그리고 생물학적 오염제거능력을 가진다.^{1,2)} 이러한 하천특성을 이용하여 하천수질을 개선하는 자연친화적인 공법으로 하상여과가 개발되었으며,³⁾ 울산광역시 태화강(연합뉴스, 2007년 1월 12일 보도), 대전광역시 갑천(조선일보, 2007년 5월 16일 보도), 경산시 남천(매일신문, 2008년 6월 12일 보도) 등에 그 도입이 검토되거나 시행되어 하천수질 및 하천환경의 개선에 활발히 적용되고 있다. 그러나 하상여과를 통한 하천수질개선을 위해서는 하상에 퇴적층이 최소 수 m 이상의 상당한 두께로 형성되어 있어야 할 뿐 아니라 퇴적층이 전석(boulder)과 같은 큰 입자를 포함하거나 세립질 모래만으로 구성되지 않아야 한다. 왜냐하면 이러한 경우 여과두께 확보를 위한 기반

[†] Corresponding author
E-mail: kimsh@yu.ac.kr
Tel: 053-810-2548

Fax: 053-810-4624

암 굴착이 필요하거나 수평집수관의 시공이 어려워지거나 또는 고가의 설비가 필요하여 그 비용이 크게 증가하기 때문이다. 우리나라의 하천과 그 지천의 상당한 부분이 이러한 조건들에 해당되어 하상여과의 비교적 높은 오염제거효능에도 불구하고 이를 널리 보급하여 하천수질을 개선하기에는 한계가 있다고 할 것이며,⁴⁾ 이를 극복 또는 보완할 수 있는 공법의 개발이 필요한 실정이다.

하상계수가 큰 우리나라 하천의 또 다른 특징은 연중 불과 며칠 또는 몇 주의 홍수에 대비하기 위하여 넓은 홍수터를 예비하고 있다는 점이다. 홍수터는 보통 투수성이 좋은 모래질 토양으로 구성되어 있고 토양여과는 오염을 잘 제거하므로 홍수터(floodplain)에서의 토양여과 즉, 홍수터여과를 도입할 경우 저농도로 오염된 다량의 물을 효율적으로 처리할 수 있어서 하천의 수질개선에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 여러 오염물의 제거효율과 처리유량 등을 포함한 토양여과의 특성을 문헌을 통해서 알아보고, 우리나라의 홍수터 면적과 홍수터 토양의 투수특성을 조사 및 분류하고 불포화 흐름해석용 전산코드를 이용하여 홍수터여과의 용량을 대략 산정한다.

2. 홍수터여과의 가능성에 대한 문헌연구

자연정화를 이용한 수처리 기술로는 안정화지(lagoon), 습지(wetland), 그리고 토양처리(land treatment) 등이 주로 사용되고 있으며, 이 중에서 토양처리는 다시 급속침투(rapid infiltration), 저율처리(slow-rate system), 월류처리(overland flow), 살수관개(spray irrigation) 그리고 토양대수층처리(soil aquifer treatment) 등의 여러 가지로 나뉜다.⁵⁾ 토양처리는 원래 도시하수처리의 초창기부터 사용되던 방식으로 20세기 초반까지 대부분의 생활하수 처리에 널리 사용되었다.⁶⁾ 이 시기에는 공학적인 설계에 근거하지 않고 하수 발생자와 경작자의 편의를 위해서 가까운 농경지에 도시하수를 관개용수로 공급하였다.⁷⁾ 이후 도시팽창과 하수처리기술의 발달로 대부분의 토양처리법이 폐기되고 현대적인 하수처리기술이 널리 확산되었으며, 1972년 미국의 공법(PL-500) 제정으로 도시하수처리의 대안 및 보조적인 수단으로서 토양처리법이 재조명 받게 되었다.^{8,9)} 도시하수의 2차 처리수에 토양대수층처리를 적용하는 경우 고도처리에 못지 않은 처리효율을 얻을 수 있어서¹⁰⁾ 최근에는 도시하수의 3차 처리공법의 일환으로 토양대수층처리가 많이 연구되고 있다.^{11~13)}

대부분의 토양처리는 하수처리장의 2차 처리수를 처리하며¹⁴⁾ 토양에는 생물막이 형성되어 2차 처리수에 잔류하는 오염물을 제거하게 된다.^{5,15)} Spyridakis와 Welch⁵⁾는 살수관개와 급속침투를 적용하여 도시하수를 3차 처리하였으며 보통의 토양에서 95% 이상의 BOD 및 SS제거율을 얻었다고 하고, Gardner 등은 도시하수의 2차 처리수에 범람관개(flood irrigation)를 적용하여 질소와 인의 제거율이 각각 90%와 95%를 얻었다고 한다. Makni¹²⁾는 1.5 m

이상의 토양층에 2차 처리수를 통과시켜 COD, 대장균, 기생충알의 대부분을 제거하였다고 하며, Kanarek과 Michail¹⁶⁾은 범람과 건조를 교대로 적용하는 토양대수층처리에서 BOD와 SS, 그리고 세균에 대해 높은 제거율을 얻었고 질소와 인도 상당히 제거하였다고 한다. Pescod¹⁷⁾는 토양대수층처리에서 SS와 대장균은 1 m의 토양층 통과에서 그리고 BOD는 2~3 m 통과에서 대부분 제거된다고 하였다. Bower 등¹⁸⁾은 급속침투지를 이용한 토양대수층처리에서 도시하수의 2차 처리수인 원수의 BOD가 10~20 mg/L이었지만 토양 9 m를 통과한 여과수에서는 1 mg/L 이하이었고, COD는 원수의 30~60 mg/L에서 여과수의 10~20 mg/L로 개선되었으며, 범람/건조(flooding/drying) 지속 시간을 조절하여 질소제거율 30~65%를 얻을 수 있었다고 한다. 또한, 그들은 9 m의 토양통과에서 40~80%의 인 제거율을 얻었고 이는 10년간의 운영에도 변하지 않았다고 한다. 하수중의 유기인은 토양여과중 생분해에 의해 모두 무기인으로 바뀌어 토양에 흡착되며 이는 다시 철이나 알루미늄 화합물과 천천히 반응하여 불용성 화합물이 되거나 칼슘화합물로 침전하므로 토양여과에서 인의 제거는 안정적인 현상이라고 할 수 있다.¹⁷⁾ Bower와 Rice¹⁸⁾는 급속침투지를 이용한 토양대수층처리에서 미량오염물질의 제거율을 조사하였으며, 비할로겐 화합물의 제거율이 50~99%로 할로겐 화합물에 비해 다소 높다고 하였고, 토양대수층처리를 통해 도시하수의 2차 처리수를 정화하는 경우 관개나 여가용수로 충분한 수질을 얻을 수 있다고 하였다. Crites 등⁶⁾은 토양대수층처리는 내분비교란물질을 잘 제거하며 여과깊이에 따라 매우 낮은 농도까지도 낮출 수 있다고 하였다. 이상으로부터 도시하수의 2차 처리수를 토양층에 통과시키는 경우 수 m의 여과에서도 상당히 양호한 수질의 여과수를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

토양처리의 경제성은 토양으로의 함양율을 높이는데 달렸으며, 함양지(infiltration basin)를 이용한 토양대수층처리가 가장 효율적이어서 이 공법이 널리 사용되고 있다.²⁰⁾ 함양지를 사용하는 경우 이를 주기적으로 건조시키면 물/토양 접촉시간은 감소하지만 장기적인 함양율은 더 높일 수 있으므로²⁰⁾ 보통 여러 개의 함양지를 운영하면서 각 함양지에서 범람과 건조를 반복하여 함양율을 극대화한다.¹⁷⁾ 함양지를 건조시키지 않고 계속해서 물로 채워두는 경우 조류성장과 SS 축적으로 인한 바닥폐색으로 인해 함양율이 크게 감소하게 된다. 조류는 침전하여 바닥에 폐색을 일으키고 pH를 상승시켜 석회석을 침전시킴으로써 토양표면을 시멘트 접합하여 폐색시키는 역할을 하므로 함양율 감소의 큰 원인이 된다. 이를 억제하기 위해서는 함양지의 수심을 가급적 얇게 유지하여 함양지에 물이 체류하는 시간을 줄임으로써 조류생장에 필요한 시간을 주지 않는 것이 효율적이었으며,^{17,18,20)} 폐색으로 인한 투수계수 감소를 보완하기 위해 함양지의 수심을 증가시키는 것은 효과가 없었다고 한다.¹⁹⁾

함양지를 폐색시키는 주요 원인은 물리적 과정으로 인

해 바닥에 발생하는 SS의 축적이다.²¹⁾ Bouwer 등¹⁸⁾에 의하면 SS농도가 20 mg/L 이하인 원수를 10년간 함양시킨 경우 함양지의 바닥에 축적된 폐색층은 건조두께로 1 cm에 달했다고 한다. 이러한 SS의 축적은 함양지를 주기적으로 건조시켜 풍부한 산소를 공급함으로써 SS의 생분해를 유도하여 완화할 수 있고,^{17,22)} 가끔씩 장시간 건조시킨 후 급어서 제거하면 함양율 감소를 예방할 수 있다고 한다.²¹⁾ SS농도가 10~20 mg/L인 2차 처리수는 1~2년에 한 번 정도 급어냄으로써 높은 함양율을 유지할 수 있다고 하며,¹⁷⁾ 원수의 SS농도가 10 mg/L 이하인 경우에는 바닥청소 없이도 높은 함양율을 유지가 가능하다고 한다.²¹⁾ 함양율 감소의 또 다른 원인은 토양층 내부에 성장하는 미생물이며, 이는 함양지의 주기적인 건조과정을 통해서 미생물 일부를 사멸시킴으로써 해소할 수 있다.^{20,22)} 한편, 함양율을 높이기 위해서는 함양지의 범람/건조 지속시간을 조정하거나 표층토에 목화쓰레기 등의 유기물질이나 토립단 형성제 등을 섞어서 토양을 교란하기도 하며 함양지의 바닥에 식생을 자라게도 한다.^{20,21)}

깨끗한 하천수를 함양지를 통해 인공함양하는 경우 함양율은 최대 3 m/day(m³/m²-day)에 이를 정도로 크지만,²⁰⁾ 2차 처리수를 원수로 사용하는 보통의 토양대수층처리에서는 원수에 포함된 SS와 유기물 등의 오염물질로 인해 함양율이 이보다 훨씬 작다. Bouwer 등²¹⁾에 의하면 토양대수층처리에서 깨끗한 물 유입시 함양율은 표층토의 투수계수와 유사한 값으로 일정하였으나, 도시하수의 2차 처리수를 원수로 사용한 경우 최대 부하율은 초기의 맑은 물 함양율의 45%이었다고 한다. Bouwer 등¹⁸⁾은 도시하수의 2차 처리수를 토양대수층처리에 적용하여 최대 함양율로 표층토양 투수계수의 34%를 얻은 바 있으나, 여러 시험결과 함양율 분포는 투수계수의 14~20%라고 하였다. 한편, BOD 농도가 230 mg/L까지 분포하는 하수원수를 토양대수층처리에 적용하는 경우 함양율은 맑은 물 함양율의 5~10%라고 한다.⁶⁾

2차 처리수로 관개할 경우 Page와 Chang²³⁾은 중금속 부하로 인해 토양오염에 이르는 기간이 보통의 토양에서 150년 이상 소요되어 중금속에 의한 토양오염이 시급한 문제가 아니라고 하였으며, Westcot과 Ayers²⁴⁾에 의하면 2차 처리수의 토양처리에서 미량오염물질의 토양축적은 무시할 수 있는 정도라고 하므로 토양처리에서 토양의 2차 오염은 현재 단계에서는 이를 고려할 필요가 없는 것으로 판단되었다.

우리나라에서는 부지확보의 어려움으로 인해 토양여과가 크게 고려된 적은 없었으나, 최근 홍수터를 이용한 하천수질개선에 대한 연구가 시도된 바 있다. Chung 등²⁵⁾은 칼럼에 낙동강 종류의 홍수터 토양을 채워 오염된 하천수를 불포화 흐름으로 통과시킨 실내실험에서 토양층 약 50 cm의 통과에서도 유기오염물이 잘 제거되었으며 유량에 따라서는 상당히 높은 탈질도 가능하다고 보고하였다. 정 등²⁶⁾은 Chung 등²⁵⁾과 유사하지만 야외에 설치된 칼럼

실험을 통해 지표에 식생이 있는 경우 유기오염물과 질소의 제거효율이 더 높아진다고 하였다. Kim 등²⁷⁾은 홍수터 여과에서 각종 오염물질 특히 질소산화물의 종류별 거동을 모사하기 위한 기초연구의 일환으로 경쟁적 Michaelis-Menten 모델의 매개변수들을 실험을 통해 구하였다. Chung 등²⁸⁾은 Kim 등²⁷⁾이 구한 모델매개변수를 적용하여 홍수터 여과에서 각종 오염물의 거동에 대한 수학적 모델연구를 수행하였고, 일정범위 이내에서는 처리유량이나 오염물 농도가 증가하여도 홍수터여과의 효능은 감소하지 않는다고 하였으며, 탈질시 발생하는 아산화질소의 대기중으로의 방출율을 계산하였다. Kim 등²⁷⁾은 도시하수의 2차 처리수를 불포화 흐름으로 통과시키는 파일럿 규모의 야외 칼럼실험을 통해 토양층 40 cm의 통과에서도 그 수질이 크게 개선된다고 보고하였다.

3. 우리나라에 적당한 홍수터여과방식 제안

하수중의 유기물은 토양중에서 쉽게 분해되고 특히 호기 조건에서는 그 분해가 더 빠르고 완전하므로¹⁶⁾ 도시하수의 2차 처리수를 원수로 사용하는 경우 홍수터여과의 처리용량은 오염물의 부하율이 아니라 처리수가 토양으로 스며드는 함양율에 의해서 결정된다고 볼 수 있다. 맑은 물의 경우 함양율은 물/토양 접촉시간에 비례하지만 하수의 경우 침전과 여과에 의한 표면폐색 그리고 영양물질이 포함된 경우 부영양화에 의한 폐색증대와 표층에서의 시멘트화에 의한 함양율 격감이 발생하므로 이를 극대화하기 위해서는 함양지에 원수를 장기간 채워두는 방식은 적합하지 않다. 따라서 함양지를 주기적으로 건조시키는 방식이 적당하며, 범람/건조 지속시간의 최적 비율은 토양종류와 원수의 성상, 처리대상 오염물질 등 여러 조건에 따라 다르지만 도시하수의 2차 처리수를 모래질 토양에서 처리할 때 범람/건조의 지속기간이 긴 경우 30일/30일 정도에서 짧은 경우 16시간/8시간까지도 운영되고 있다.¹⁷⁾

그러나 우리나라의 하천조건에서 이러한 비교적 장기간의 함양지 채류방식을 적용하기는 어렵다고 할 것이다. 왜냐하면 도시하수의 2차 처리수를 장시간 햇빛에 노출시키는 경우 부영양화가 발생할 뿐 아니라 연중 수 회 발생하는 홍수로 인해 함양지가 유실될 가능성이 크기 때문이다. 또한, 함양지가 장시간 범람상태로 있는 경우 토양이 호기환경으로 유지되기 어려워 오염제거에 불리한 단점도 있다. 한편, Skaggs와 Nassehzdeh-Rabrizi³⁰⁾에 의하면 토양 침투에서 범람/건조의 주기가 짧을수록 장기간의 함양율은 더 커진다고 하므로 우리나라에서의 홍수터여과에서는 범람/건조의 주기를 1-2시간/1-2시간 정도로 짧게 운영하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이 경우 연못 형태의 함양지는 불필요하며, 홍수터에 적당한 간격으로 다수의 원수 출수대를 설치하고, 범람시에는 원수를 일제히 공급하여 홍수터 표면을 적시고 건조시에는 이를 중단하면 될 것이다. 이러한 운영방법을 적용하면 홍수터에 식생이 자

랄 수 있어 토양의 함양율을 증대시키고, 갯벌의 호흡과 같이 토양중의 공기를 주기적으로 대기와 교환시켜 토양을 호기환경으로 유지시켜줌으로써 오염제거효능을 향상시키는 잇점도 기대할 수 있을 것이다.

4. 조사방법

본 연구에서는 전국 5개의 주요하천과 20개의 주요 1지천의 홍수터 면적을 구하였고, 각 하천별로 상류, 중류, 그리고 하류에서 홍수터의 면적이 넓은 지점들을 선정하여 홍수터 표층토양의 투수계수 및 불포화 투수특성을 조사하고 입도를 분석하였다. 이들 자료를 불포화 흐름해석용 전산코드에 입력하여 홍수터여과의 처리용량도 산정하였다.

홍수터의 면적은 맵토피아(maptopia.com)와 구글맵(maps.google.com)을 이용하여 구하였다. 범람/건조 지속시간을 짧게 운영하는 경우 토양중의 물 흐름은 불포화 흐름이므로 이의 해석에 필요한 매개변수들도 구하였다. 토양의 불포화 투수특성은 van Genuchten 모델인

$$\frac{K(\Psi)}{K_s} = \frac{1 - (\alpha\Psi)^m [1 + (\alpha\Psi)^n]^{-m^2}}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \quad (1)$$

로 나타내었고, 여기서 K 는 토양수압의 함수로 나타낸 불포화 투수계수(L/T), K_s 는 포화 투수계수(L/T), $-\Psi$ 는 모세관 수두(L), α 는 공기 유입점에서의 매트릭 수두의 역수(L⁻¹), n 은 흙의 물리적 성질에 따른 상수이며 실험으로부터 구할 수 있고, $m = 1 - \frac{1}{n}$, $l = 0.5$ 를 사용한다.³¹⁾ 흙의 수분함량 이력현상을 고려한 K 와 Ψ 의 관계에 대해서는 Kool과 Parker³²⁾ 등의 연구가 있으나, 이력현상을 고려하는 것은 그 해석이 매우 복잡할 뿐 아니라 이력 현상을 고려하지 않고 단순 주춧음곡선을 사용했을 때에도 그 오차는

크지 않으므로³³⁾ 본 연구에서는 이를 고려하지 않았다.

토양의 불포화 투수특성을 결정하는 모델의 매개변수들은 원판형 부압침투계(disc tension infiltrometer)를 이용하여 구했으며, 이를 위해 먼저 침투계를 측정대상토양의 표면에 설치하고 여러 가지 주입수압에 대한 침투율을 구하였다. 불포화 투수계수를 모사하는 Gardner의 모델과 토양으로의 침투율을 나타내는 Wooding의 식을 결합하여 이를 미세수압구간별로 적용하는 Jarvis와 Messing³⁴⁾의 방법으로 측정치를 해석하였으며, 이로부터 포화투수계수와 α 그리고 n 을 얻었다. 토양조사는 표층토양에 국한하였고, 낙동강 상류의 구미지점에 대해 이를 적용하는 예를 Fig. 1에 나타내었으며, 이 토양의 입도분석의 예는 Fig. 2에 나타내었다. 토양의 입도분석은 KS F 2302에 의해 수행하였다.

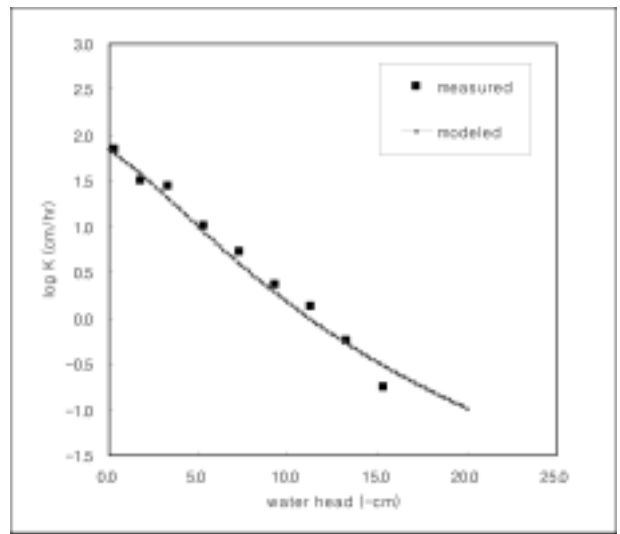


Fig. 1. Determination of hydraulic conductivity, α and n through the procedure of Jarvis and Messing(1995) for a flood-plain soil of the Nakdong river(Gumi site).

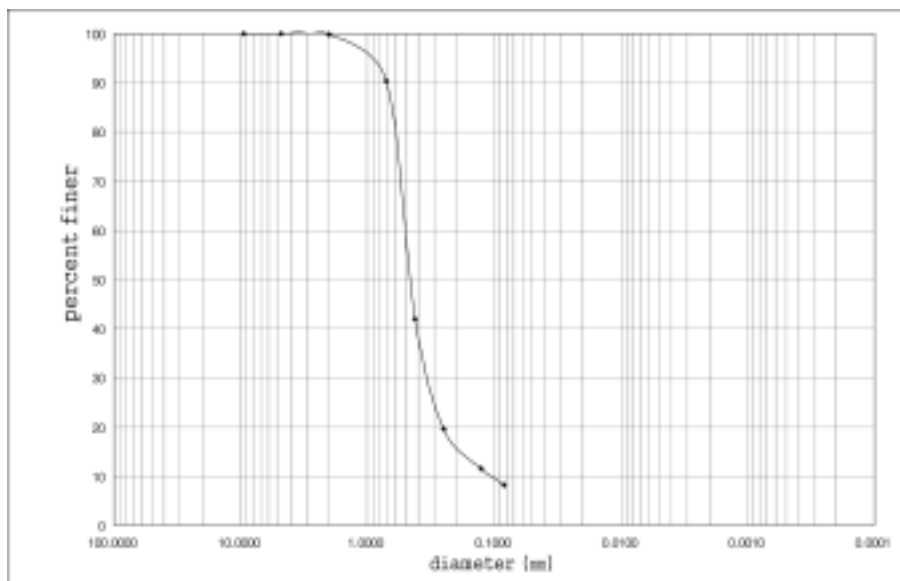


Fig. 2. Grain size distribution of a surface soil from the Nakdong river(Gumi site).

홍수터여과에서 처리용량계산은 Richards 방정식을 해석함으로써 얻을 수 있으며,³¹⁾ 본 연구에서는 유한요소법을 이용한 불포화 흐름 해석용 전산코드인 HYDRUS-1D³⁵⁾를 사용하였다. 홍수터여과는 넓은 지역에서 연직하방으로의 물 흐름을 이용하므로 흐름을 연직 1차원 현상으로 보았다. 우리나라의 홍수터에서 지하수위의 깊이는 8 m에 달하는 곳도 있으며,¹⁾ 지하수위가 깊으면 함양율이 증가하고 오염제거효율도 증가하지만 토양처리에서 활발한 오염제거가 일어나는 구간은 토양에 따라 표층 60~120 cm에 불과하므로³⁰⁾ 지하수위는 지표하 3 m에 있다고 보았다. 영역은 50개의 요소로 나누었다. 모래질 토양을 이용한 토양처리에서 폐색은 주로 표층 약 3 cm에서 발생하므로¹⁷⁾ 지표에서의 폐색을 고려하기 위하여 최상층 요소는 그 포화투수계수가 원토양의 1/10로 가정하였으며³⁶⁾ 두번째 요소부터는 측정값을 그대로 적용하였다. 홍수터 토양은 여러 층으로 구성되어 있으나 본 연구에서는 최상부의 토양층만으로 홍수터가 구성되어있다고 보았다. 폐색이 발생하는 최상층의 α 와 n 값은 포화투수계수에 상응하는 적당한 값들로 가정하였으며, 이는 HYDRUS-1D에서 제공된다. 범람/건조의 지속시간은 2시간/1시간으로 보아 지표에서의 경계조건은 범람시 수압수두를 0으로 보았고 건조시에는 물 흐름율(flux)을 0으로 보았으며, 아래쪽 경계조건은 지하수면으로 보아 수두를 0으로 고정하였다.

낙동강 상류의 구미지점에서 모델운영시 지하 1.5 m 지점에서 시간에 따른 수분함량의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 지표에서 범람과 건조가 교대로 적용될 때 지하 1.5 m에서의 흐름은 토양층의 포화도가 일정한 주기로 변하는 불포화 흐름임을 알 수 있고, 이로 인해 토양층의 공기가 지속적으로 대기와 교환되어 호기환경의 유지에 유리함을 알 수 있다. 같은 조건에 대해 지표에서의 함양율과 지하수면에서의 함양율을 Fig. 4에 나타내었다. 지표에서의 함양율에 비해 지하수면에서의 함양율은 상당히 평균화되어 있으며, 이 경우 여과수의 불포화대 체류시간은 약 3.6시간 이었고 함양율은 3.23 m/day이었다. 홍수터여과에서 여과수는 불포화대를 통과한 후 상당한 거리의 포화대를 다시 통과하여 여과수 회수체계에 이르므로 토양내 체류시

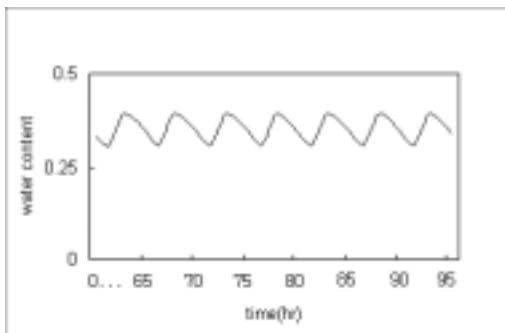


Fig. 3. Water content variation at the soil depth of 1.5 m during floodplain filtration in the upper reach of the Nakdong river(flooding/drying of 2/1 hours applied on the soil surface).

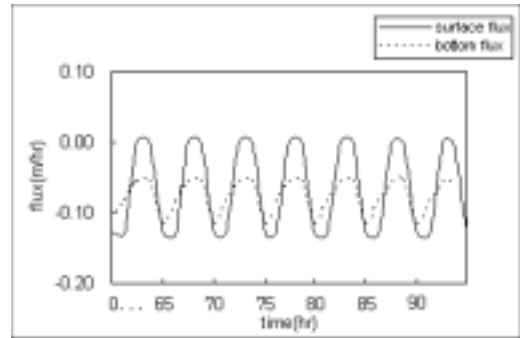


Fig. 4. Water flux variation at the soil surface and water table during floodplain filtration in the upper reach of the Nakdong river(same application method as in Fig. 3).

간은 대부분의 오염물 분해에 부족하지 않을 것으로 판단된다.

5. 결과 및 고찰

우리나라 주요 하천과 그 1지천에서 폭 50 m 이상인 홍수터의 총면적은 106,161,834 m²이었다. 실질적인 홍수터여과의 운영에 필요한 홍수터 폭의 최소치를 100 m로 보아 하천별로 폭 100 m 이상인 홍수터의 면적을 Table 1에 나타내었으며, 우리나라 전체로는 90,335,576 m²이고, 낙동강이 가장 많아 47,044,080 m²임을 알 수 있었다.

Table 1. List of floodplain area of major rivers in Korea with the width of 100 m or more

river	width (m)	area (m ²)		total (m ²)
		left side	right side	
Han	100~200	3,122,900	2,374,400	7,969,100
	200~	1,867,200	604,600	
Anyang	100~200	0	402,500	402,500
	200~	0	0	
Tan	100~200	100,000	60,000	160,000
	200~	0	0	
Huk	100~200	35,000	18,000	53,000
	200~	0	0	
Kumdang	100~200	40,000	0	40,000
	200~	0	0	
Chungmi	100~200	118,000	731,000	929,000
	200~	80,000	0	
subtotal		5,363,100	4,190,500	9,553,600
Kum	100~200	3,935,000	3,477,000	12,379,500
	200~	2,145,000	2,822,500	
Miho	100~200	2,154,000	1,450,500	5,200,400
	200~	850,000	745,900	
Jee	100~200	160,000	110,000	270,000
	200~	0	0	
Nonsan	100~200	176,000	0	392,000
	200~	0	216,000	
subtotal		9,420,000	8,821,900	18,241,900

Youngsan	100~200	1,549,000	1,328,500	11,269,600
	200~	4,695,100	3,697,000	
Hoanglyong	100~200	450,000	690,000	1,140,000
	200~	0	0	
Jeesuk	100~200	230,000	537,500	767,500
	200~	0	0	
subtotal		6,924,100	6,253,000	13,177,100
Sumgin	100~200	634,200	892,700	1,687,300
	200~	160,400	0	
Jookyo	100~200	26,400	16,236	142,636
	200~	0	100,000	
Yo	100~200	161,460	212,300	488,960
	200~	55,200	60,000	
subtotal		1,037,660	1,281,236	2,318,896
Sunakdong	100~200	39,000	18,850	475,850
	200~	418,000	0	
Nakdong	100~200	6,909,100	3,238,900	37,509,800
	200~	11,975,700	15,386,100	
Milyang	100~200	212,000	264,000	1,316,000
	200~	840,000	0	
Nam	100~200	553,000	621,000	1,422,000
	200~	192,000	56,000	
Kumho	100~200	692,770	344,400	1,731,230
	200~	154,160	539,900	
Wi	100~200	665,600	112,000	3,173,000
	200~	840,400	1,555,000	
Byungsung	100~200	180,000	22,000	202,000
	200~	0	0	
Young	100~200	348,000	78,000	426,000
	200~	0	0	
Banbyun	100~200	113,000	214,800	788,200
	200~	253,000	207,400	
subtotal		24,385,730	22,658,350	47,044,080
Grand total		47,130,590	43,204,986	90,335,576

각 하천의 상류, 중류, 그리고 하류에서 홍수터의 면적이 넓은 지점들을 선정하여 지점별로 투수계수와 α 및 n 값, 그리고 입도분석에 의해 분류한 토양의 종류를 Table 2에 나타내었다. 토양은 대부분 실트질 모래-모래에 속하고, 본 연구에서 구한 α 와 n 값들은 해당되는 토양종류의 범위에 속하였다.³¹⁾ 포화투수계수와 α 그리고 n 은 상류, 중류, 하류 등 하천에서의 위치에 따라 일정한 경향을 나타내지는 않았다.

우리나라 홍수터의 표층토양인 실트질모래-모래는 토양대수층처리를 통한 오염물 제거에 적합한 범위에 속한다.¹⁷⁾ 2시간/1시간의 범람/건조 시간을 적용하여 HYDRUS-ID로 계산한 우리나라의 토양침투율은 0.36 m/day(한강상류 양평)-8.20 m/day(낙동강하류 물금)이었고, 홍수터 토양의 포화투수계수 값의 12~30%이어서 Bouwer 등¹⁸⁾이 보고한 14~20%와 유사함을 알 수 있었다. 외국의 경우 0.23 m/day 또는 0.3 m/day의 함양율에서도 토양처리를 운영하고 있고,^{16,17)} 우리나라의 홍수터에서는 표층토양을 치환

Table 2. Hydraulic conductivity, α , n and soil type of flood-plain soils of major rivers in Korea

river	distance from the river mouth (km, location)	hydraulic conductivity (m/d)	α	n	soil type
Han	48.0(Gangseo)	5.88	0.124	1.80	SP, SC
	61.0(Youngdungpo)	22.03	0.170	2.28	SP, SC
	67.9(Seocho)	13.56	0.140	1.56	SP, SC
	83.9(Gangdonrg)	5.27	0.120	1.70	SP, SC
	126.0(YangPyoung)	2.33	0.124	1.56	SP, SC
	152.0(YeoJoo)	7.00	0.080	1.45	SP, SC
Keum	55.0(BuYeo)	23.41	0.075	1.60	SC
	64.4(Tanchun)	17.11	0.090	1.89	SP, SC
	71.4(Usung)	16.76	0.080	1.75	SC
	82.4(Gongjoo)	9.76	0.075	1.58	SC
	111.4(Chungyon)	9.94	0.075	1.89	SP, SC
Youngsan	165.4(Youngdong)	23.41	0.075	1.60	SP
	48.0(Najoo)	5.01	0.150	1.30	SP, SC
	67.4(Namgu)	4.49	0.060	1.45	SP, SC
	71.8(Goangsan)	3.37	0.062	1.20	SP, SC
	73.5(Seogu)	10.28	0.124	1.60	SP, SC
Sumgin	86.2(Bukgu)	3.72	0.071	1.40	SP, SC
	4.7(Hadong)	12.44	0.132	1.70	SP, SC
	32.7(Gule)	13.74	0.079	1.85	SP, SC
	39.6(Munchuk)	13.74	0.080	1.80	SP, SC
Nakdong	68.6(Goksung)	3.28	0.145	2.20	SP, SC
	24.2(Mulgum)	12.44	0.132	1.70	SC
	53.4(Changyun)	12.01	0.120	1.98	SP, SC
	135.1(Daegu)	25.23	0.160	2.20	SC
	181.7(Yaegoan)	9.07	0.124	2.00	SP, SC
	223.6(Gumi)	15.72	0.150	2.00	SP, SC
	243.5(Sangjoo)	34.56	0.124	2.00	SP, SC

또는 피복 등에 의해 개선하여 홍수터여과의 용량을 증가시킬 수 있을 것으로 판단되므로 홍수터여과의 가능성은 크다고 할 것이다. HYDRUS-ID로 계산한 각 하천별 예상 함양율을 Table 1에 적용하여 각 하천별 홍수터여과의 용량을 계산하였으며 이를 Table 3에 나타내었다. 우리나라 전체의 홍수터여과 용량은 182,332,644 m³/day로 매우 크고, 낙동강-금강-영산강-한강 수계의 순서임을 알 수 있다. Table 3에는 각 하천별 하수유입량(하수종말처리시설 운영 실태 분석결과, 환경부, 2003)도 나타내었으며, 탄천에서는 홍수터여과의 용량이 하수유입량보다 적지만 나머지 하천에서는 하천에 유입하는 하수를 모두 처리할 수 있는 용량임을 알 수 있었다. 또한, 홍수터는 하천의 한 부분에 치중되어 있지 않고 하천을 따라 비교적 골고루 분포되어 있어서 도시별로 발생하는 하수를 가까운 거리에서 처리할 수 있을 것으로 판단되었다. 따라서 2차 처리 후 하천으로 바로 유입되는 하수를 홍수터여과를 통해 한번 더 처리하여 방류하는 경우 하천의 수질은 개선 될 가능성이 있다.

Table 3. Estimation of floodplain filtration capacity of major rivers in Korea compared with the wastewater discharge rate

river	width (m)	floodplain filtration capacity (m ³ /day)		floodplain filtration capacity (m ³ /day)	wastewater discharge rate (m ³ /day)
		left side	right side		
Han	100 ~ 200	6,245,800	4,748,800	15,938,200	5,317,870
	200 ~	3,734,400	1,209,200		
Anyang	100 ~ 200	0	805,000	805,000	358,600
	200 ~	0	0		
Tan	100 ~ 200	200,000	120,000	320,000	447,900
	200 ~	0	0		
Huk	100 ~ 200	70,000	36,000	106,000	9,530
	200 ~	0	0		
Kumdang	100 ~ 200	44,000	0	44,000	14,390
	200 ~	0	0		
Chungmi	100 ~ 200	236,000	1,462,000	1,858,000	35,730
	200 ~	160,000	0		
subtotal		10,690,200	8,381,000	19,071,200	6,184,020
Kum	100 ~ 200	8,263,500	7,301,700	25,996,950	43,400
	200 ~	4,504,500	5,927,250		
Miho	100 ~ 200	4,523,400	3,046,050	10,920,840	268,550
	200 ~	1,785,000	1,566,390		
Jee	100 ~ 200	336,000	231,000	567,000	15,180
	200 ~	0	0		
Nonsan	100 ~ 200	369,600	0	823,200	10,290
	200 ~	0	453,600		
subtotal		19,782,000	18,525,990	38,307,990	337,420
Youngsan	100 ~ 200	2,633,300	2,258,450	19,158,320	46,810
	200 ~	7,981,670	6,284,900		
Hoanglyong	100 ~ 200	765,000	1,173,000	1,938,000	10,630
	200 ~	0	0		
Jeesuk	100 ~ 200	391,000	913,750	1,304,750	740
	200 ~	0	0		
subtotal		11,770,970	10,630,100	22,401,070	58,180
Sumgin	100 ~ 200	1,414,266	1,990,721	3,762,679	11,570
	200 ~	357,692	0		
Jookyo	100 ~ 200	58,872	36,206	318,078	0
	200 ~	0	223,000		
Yo	100 ~ 200	360,056	473,429	1,090,381	0
	200 ~	123,096	133,800		
subtotal		2,313,982	2,857,156	5,171,138	11,570
Sunakdong	100 ~ 200	80,730	39,020	985,010	743,720
	200 ~	865,260	0		
Nakdong	100 ~ 200	14,301,837	6,704,523	77,645,286	2,657,050
	200 ~	24,789,699	31,849,227		
Milyang	100 ~ 200	438,840	546,480	2,724,120	31,820
	200 ~	1,738,800	0		
Nam	100 ~ 200	1,144,710	1,285,470	2,943,540	139,960
	200 ~	397,440	115,920		

Kumho	100 ~ 200	1,434,034	712,908	3,583,646	5,310
	200 ~	319,111	1,117,593		
Wi	100 ~ 200	1,377,792	231,840	6,568,110	6,260
	200 ~	1,739,628	3,218,850		
Byungseung	100 ~ 200	372,600	45,540	418,140	27,060
	200 ~	0	0		
Young	100 ~ 200	720,360	161,460	881,820	0
	200 ~	0	0		
Banbyun	100 ~ 200	233,910	444,636	1,631,574	50,460
	200 ~	523,710	429,318		
subtotal		50,478,461	46,902,785	97,381,246	3,661,640
grand total		95,035,613	87,297,031	182,332,644	10,252,830

홍수터여과의 용량이 커서 하수처리장 방류수를 처리하고도 남는 지역에서는 홍수터여과를 상수원수 생산에 활용할 수 있을 것이다. 우리나라는 강변여과나 하상여과에 불리한 지역이 많으므로⁴⁾ 이러한 곳에서는 홍수터여과를 간접취수공법으로 활용하는 경우 양질의 상수원수를 안정적으로 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 이 공법은 하천에 오염사고가 발생하는 경우 강변/하상여과와 달리 오염원이 도달하기 전에 많은 양의 하천수를 추가로 토양중에 저장함으로써 오염원이 통과하는 동안에도 사고의 영향을 받지 않은 여과수를 확보할 수 있다. 또한, 해발고도가 낮아서 강변/하상여과시 염수침투가 우려되는 해안지역에서는 지하수위를 높임으로써 염수/담수 경계면을 크게 낮추어 양질의 여과수를 얻을 수 있는 잇점도 가지고 있다.³⁷⁾

6. 결론

문헌조사와 현장조사, 그리고 불포화 흐름해석용 전산코드 등을 통해 우리나라에서 홍수터 토양을 이용한 토양처리의 가능성을 평가하고 그 처리용량을 산정하였다. 우리나라의 홍수터는 토양여과에 적합한 투수계수와 표층토를 가지고 있으며, 대도시 주변에도 홍수터가 많이 분포되어 있어서 하수의 추가처리로 홍수터여과가 활용되기에 유리한 여건임을 알 수 있었다. 홍수터여과의 용량은 우리나라 전체에서 약 182,000,000 m³/day로 계산되어 홍수터여과를 적용할 경우 전국의 도시하수의 2차 처리수를 전량 처리할 수 있고 따라서 하천의 수질의 개선 가능성이 있다고 판단한다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(수생태복원 사업단)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 한국수자원공사, “전국 총적층지하수 조사 보고서,” (1996).

2. Taylor, S. W. and Jaffe, P. R., "Substrate and Biomass Transport in a Porous Medium," *Water Resour. Res.*, **26**(9), 2181~2194(1990).
3. 김승현, 정장식, "하상여과를 이용한 금호강 수질개선연구," 환경연구(영남대학교 환경문제연구소 논문집) **18**(2), 143~148(1999).
4. 김승현, "우리나라에서 강변여과와 하상여과의 비교," 대한환경공학회지, **29**(10), 1154~1162(2007).
5. Spyridakis, D. E. and Welch, E. B., "Treatment processes and environmental impacts of waste effluent disposal," In Sanks, R. L. and Asano, T. (ed.) "*Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater*," Ann Arbor Science, Michigan(1976).
6. Crites, R. W., Middlebrooks, E. J., and Reed, S. C., "Natural Wastewater Treatment Systems," CRC Press (2006).
7. Willems, D. G., "Land treatment of wastewaters, institutional and regulatory agency approach," In "Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater," edited by Sanks, R.L., and Asano, T., Ann Arbor Science, Michigan(1976).
8. Loehr, R. C., Jewell, W. J., Novak, J. D., Clarkson, W. W., and Friedman, G. S., "*Land application of wastes*," Vol. I, van Nostrand Reinhold Company, New York (1979).
9. Tebbutt, T. H. Y., "*Principles of water quality control*," 4th ed., Pergamon Press, New York(1992).
10. Amy, G., Wilson, G. G., Conroy, A., Chahbandour, J., Zhai, W., and Siddiqui, M., "Fate of chlorination byproducts and nitrogen species during effluent recharge and soil aquifer treatment," *Water Environ. Res.*, **65**, 726~732(1993).
11. Gardner, E. A., Morton, D., Sands, J., Matthews, P., Cook, F. J., and Jayawardane, N. S., "The filter system for tertiary treatment of sewage effluent by land application - its performance in a subtropical environment," *Water Sci. Technol.*, **43**, 335~342(2001).
12. Makni, H., "Disinfection of secondary effluents by infiltration percolation," *Water Sci. Technol.*, **43**, 175~178 (2001).
13. "Advances in Soil Aquifer Treatment for Sustainable Water Reuse," AWWA Research Foundation(2006).
14. Sharma, S. K., Harun, C. M., and Amy, G., "Framework for Assessment of Performance of Soil Aquifer Treatment Systems," *Water Sci. Technol.*, **57**(6), 941~946 (2008).
15. Sopper, W. E., "Use of soil-vegetation biosystem for wastewater recycling," In Sanks, R. L. and Asano, T. (ed.) "*Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater*," Ann Arbor Science, Michigan(1976).
16. Kanarek, A. and Michail, M., Groundwater recharge with municipal effluent: DAN region reclamation project, Israel, *Water Sci. Technol.*, **34**, 227~233(1996).
17. Pescod, M. B., "Wastewater treatment and use in agriculture-FAO irrigation and drainage paper 47," FAO, Rome(1992).
18. Bouwer, H., Rice, R. C., Lance, J. C., and Gilbert, R. G., "Rapid-infiltration research at Flushing Meadows Project, Arizona," *J. WPCF*, **52**(10), 2457~2470(1980).
19. Bouwer, H. and Rice, R. C., "Renovation of wastewater at the 23rd Avenue rapid infiltration project," *J. WPCF*, **56**(1), 76~83(1984).
20. Todd, D. K., "Ground Water Hydrology," John Wiley & Sons, Inc.(1959).
21. Bouwer, H., Rice, R. C., and Escarceca, E. D., "High-rate land treatment I : Infiltration and hydraulic aspects of the Flushing Meadows project," *J. WPCF*, **46**(5), 834~843 (1974a).
22. Bouwer, H., Lance, J. C., and Riggs, M. S., "High-rate land treatment II : Water quality and economic aspects of the Flushing Meadows project," *J. WPCF*, **46**(5), 844~859(1974b).
23. Page, A. L. and Chang, A. C., "Fate of wastewater constituents in soil and groundwater: Trace elements," In Pettygrove G. S. and Asano, T. (ed.) "*Irrigation with reclaimed municipal wastewater - A guidance manual*," Lewis Publishers Inc., Boca Raton, New York(1985).
24. Westcot, D. W. and Ayers, R. S., "Irrigation water quality criteria," In Pettygrove G. S. and Asano, T. (ed.) "*Irrigation with reclaimed municipal wastewater - A guidance manual*," Lewis Publishers Inc., Boca Raton, New York(1985).
25. Chung, J. B., Kim, S. H., Jeong, B. R., and Lee, Y. D., "Removal of Organic Matter and Nitrogen from River Water in a Model Floodplain," *J. Environ. Quality*, **33**, 1017~1023(2004).
26. 정병룡, 정종배, 김승현, 이영득, 조현중, 백남주, "홍수터여과를 이용한 하천수의 질소와 유기물 제거에 미치는 근권의 효과," 한국토양비료학회지, **36**(1), 8~15(2003).
27. Kim, S. H., Chung, J. B., Jeong, B. R., Lee, Y. D., and Prasher, S. O., "Electron Affinity Coefficients of Nitrogen Oxides and Biodegradation Kinetics in Denitrification of Contaminated Stream Water," *J. Environ. Quality*, **32**, 1474~1480(2003).
28. Chung, J. B., Kim, S. H., Jeong, B. R., Lee, Y. D., and Prasher, S. O., "Modeling Floodplain Filtration for the Improvement of River Water Quality," *Transport in Porous Media*, **60**, 319~337(2005).
29. 김승현, 정종배, 하현수, Shiv O. Prasher, "불포화 사질토양을 이용한 도시하수의 3차 처리," 한국환경농학회지,

- 22(2), 111~117(2003).
30. Skaggs, R. W. and Nassehzdeh-Rabrizi, A., "Drainage Systems For Land Treatment of Wastewater," *J. Irrig. Drain.*, **108**(3), 196~211(1982).
 31. Guymon, G. L., "Unsaturated Zone Hydrology," Prentice-Hall, London(1994).
 32. Kool, J. B. and J. C. Parker, "Development and evaluation of closed-form expressions for hysteretic soil hydraulic properties," *Water Resour. Res.*, **23**, 10~114(1987).
 33. Whisler, F. D. and Watson, K. K., "Analysis of infiltration into draining porous media," *J. Irrig. Drain. Div., Proc. of ASCE*, **95**(IR4), 481~491(1969).
 34. Jarvis, N. J. and I. Messing, "Near Saturated Hydraulic Conductivity in Soils of Contrasting Texture Measured by Tension Infiltrometer," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59**, 27~34(1995).
 35. Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., and van Genuchten, M. Th., "The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably Saturated Media," Department of Environmental Sciences, University of California at Riverside, California, U.S.A.(2008).
 36. 김승현, 손동빈, 안규홍, "하상여과 모형을 이용한 투수 계수 감소현상 연구," *대한토목학회지*, **25**(4B), 301~308(2005).
 37. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., "Physical and chemical hydrogeology," John Wiley & Sons, Inc., New York(1990).