

# 홍수터여과에서 원수공급체계의 설계요소에 대한 실험연구

## An Experimental Study on the Design Factors of Raw-water Supply System in Floodplain Filtration

김호석 · 김승현 †  
Hoh-Seok Kim · Seung-Hyun Kim †

영남대학교 환경공학과  
Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

(2009년 6월 8일 접수, 2009년 9월 11일 채택)

**ABSTRACT** : Sand tank experiments were performed along with on-site supplier experiments in order to obtain design factors for the raw-water supply system in floodplain filtration. Results of the sand tank experiment elucidated that the infiltration rate was approximately proportional to the soil permeability and was not significantly influenced by short periods of rest. The average daily infiltration rate calculated by taking both flood and rest periods into account increased with increasing flood period, and was observed to reach an asymptote. Under the conditions of this study, the maximum infiltration rates obtained for both Daegu and Mulgeum soils with 15 min/ 30 min of rest/flood periods were 6.3 m/day and 1.4 m/day respectively, which were 42% and 70% of their hydraulic conductivities, respectively. The process of soil filtration resulted in a gradual decrease of hydraulic conductivity; a decrease of 27% was observed for the soil of Mulgeum over a period of 8 days. From the data obtained from the supplier experiment, it was evident that the radius of the flooded area increased as the supply rate increased for soils of Gumi and Sangju, however, there was an inverse correlation between hydraulic conductivity and the rate of increase in the radius. Results also showed that the time required to cover the entire soil surface with water, in other words, the time to reach the maximum flood radius from the commencement of the water emission was as short as 3 to 4 minutes for all the soils. Also, the average infiltration rate for the entire flood period did not change significantly when the rest period was shorter than an hour.

**Key words** : Floodplain filtration, Water supply, Design factors, Hydraulic conductivity, Rest/flood

**요약** : 홍수터여과에서 원수공급체계의 설계인자를 얻기 위해 모래통 실험과 현장 출수대 실험을 수행하였다. 모래통 실험 결과 침투율은 대략 토양의 투수계수에 비례하였으며, 짧은 시간의 휴지는 침투율에 거의 영향을 주지 않았다. 범람과 휴지를 고려한 일평균 침투율은 범람이 길어질수록 증가하여 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타냈다. 실험범위에서는 대구와 물금의 토양에서 휴지/범람이 15분/30분일 때 최대 침투율로 각각 6.3 m/day와 1.4 m/day을 얻었으며, 이 값들은 포화투수계수 값의 42%와 70%씩이었다. 토양여과로 인해 투수계수는 완만히 감소하였으며 물금토양에서 8일 동안 27%가 감소하였다. 출수대 실험결과 상주와 구미의 토양에서는 유출유량이 증가함에 따라 범람반경이 증가하며 토양의 포화투수계수가 클수록 그 증가율은 감소하는 형태를 보였다. 토양면을 완전히 적시는데 필요한 시간 즉, 유출 시작으로부터 범람반경에 도달하는데 필요한 시간은 3~4분에 불과한 것을 알 수 있었다. 또한, 1시간 이내의 휴지시간을 적용하는 경우 전체 범람시간 동안의 평균 침투율에는 거의 변화가 없었다.

**주제어** : 홍수터여과, 원수공급, 설계요소, 투수계수, 휴지/범람

### 1. 서론

우리나라 하천은 하상계수가 커서 연중 몇 주 동안의 범람기에는 하천의 유량이 너무 많아 치수에 어려움을 겪지만 그 외의 평상시에는 하천유량이 적어 오염에 취약하기 때문에 이수에 어려움이 있다. 하천의 이러한 특성으로 인해 유량이 적은 평상시에는 하천 수질관리를 위하여 다양한 직접

정화공법들이 제안되어 왔다. 이들 공법들은 오염된 하천의 바닥이나 하안에 미생물이 부착할 수 있는 인공담체를 배치하거나 오염된 하천수를 고수부지로 끌어내어 인위적인 방법으로 처리한 후 이를 다시 하천에 유입시키는 방식 등이 주를 이룬다. 그러나 이러한 방법들은 처리효율이 낮거나 대규모 처리가 어렵거나 또는 홍수시 설비의 안전성을 확보하기 어려워 적용에 어려움이 따른다.<sup>1)</sup>

† Corresponding author : E-mail : kimsh@yu.ac.kr Tel : 053-810-2548 Fax : 053-810-4624

우리나라 하천은 큰 하상계수로 인해 층적층이 발달하였으며, 이 층적층을 이용하여 하천수를 직접 정화하는 방법으로 하상여과가 개발되었고<sup>2)</sup>, 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 이는 하상에 퇴적층이 최소 수 m 이상의 상당한 두께로 형성되어 있어야 할 뿐 아니라 퇴적층이 전석과 같은 큰 입자를 포함하지 않아야 하고 세립질 모래만으로 구성되지도 않아야 하는 등의 조건이 필요하여 높은 오염제거효능에도 불구하고 이를 널리 보급하여 하천수질을 개선하기에는 한계가 있다고 할 것이다.<sup>3)</sup>

하상계수가 큰 우리나라 하천의 또 다른 특징은 대부분의 하천에 넓은 홍수터를 예비하고 있다는 점이다. 여기서 홍수터는 홍수시에만 범람하는 제외지의 고수부지를 의미하며 이를 이용하여 하천수질을 개선하는 공법으로 홍수터여과가 제안되었다.<sup>4,5)</sup> 홍수터여과는 도시하수의 2차 처리수를 하천에 직접 방류하지 않고 홍수터의 토양표면에 침투시켜 토양을 통과하는 동안 깨끗해진 여과수를 지하에서 회수하여 하천에 방류함으로써 하천수질을 개선하는 공법이다. 또한 오염된 하천수를 같은 방법으로 정화한 후 그 여과수를 회수하여 하천에 되돌리거나 상수원수 등의 다른 용도로 사용할 수도 있을 것이다. 최 등(2009)은 문헌 및 지형도 조사, 우리나라 주요 하천의 여러 홍수터에서의 불포화투수 실험, 그리고 불포화 흐름해석용 전산코드인 HYDRUS-1D<sup>6)</sup>를 이용한 계산 등을 통해 우리나라 하천에서 홍수터여과의 가능성을 제시하였으며, 우리나라 주요 하천의 전체 홍수터여과 용량도 산정하였다. 용량산정시 이들은 하상계수가 큰 우리나라 하천의 특성에 부합하도록 기존의 토양대수층처리에서 사용하는 장기간의 범람/건조방식<sup>7)</sup>을 지양하고 2시간/1시간의 짧은 범람/휴지방식을 적용하였다.

홍수터여과와 유사한 공법으로 세계적으로 많이 사용되는 토양대수층처리는 함양지를 설치하고 여기에 원수를 약 30 cm 이상의 상당한 수심으로 1~2개월 정도의 비교적 긴 기간 동안 채워두어 원수의 토양침투를 유도한 후 역시 몇 주 정도의 비교적 긴 기간 동안 수조의 바닥을 건조시킴으로써 폐색을 예방하여 다음 범람시기에서의 침투율을 유지하는 방식이다.<sup>7)</sup> 그러나 이러한 장기간의 범람/건조방식은 토양내부를 호기상태로 유지하는데 불리하여 오염처리효율을 크게 감소시키고,<sup>8)</sup> 조류와 해충이 발생할 수 있으며, 홍수기에 설비가 파손될 가능성이 커서 우리나라와 같이 하상계수가 큰 하천의 홍수터에서는 불리한 방식이라 할 것이

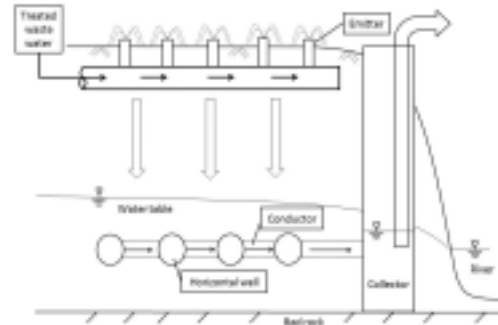


Fig. 1. Schematization of floodplain filtration.

다. 따라서 우리나라의 홍수터여과에서는 짧은 주기의 범람/휴지방식을 적용하는 것이 유리할 것으로 판단되었고, 적당한 간격으로 설치된 다수의 출수대에서 일정시간 동안 동시에 원수를 다량으로 공급함으로써 토양표면을 수심 약 5 cm 이내의 범람상태로 유지하여 토양침투를 유도한 후 이를 중단하여 표층을 짧은 시간 동안 건조시켜 토양가스를 교환시키는 과정을 반복하며, 함양지는 설치하지 않는다. Fig. 1은 홍수터여과를 하수처리장 방류수(2차 처리수)의 추가처리에 적용하는 개요도이다. 토양표면에 설치된 다수의 출수대(emitter)를 포함한 하수처리장 방류수(Treated Waste Water) 공급체계와 일정한 토양깊이에 설치된 수평집수관(Horizontal Well), 도수관(Conductor)등의 여과수 회수체계로 구성되어 있다.

출수대의 설치간격과 유출유량 그리고 범람/휴지의 지속 시간은 홍수터여과의 설계에서 중요한 요소이며 원수의 수질, 기후, 토양의 투수특성 등이 큰 영향을 줄 것으로 판단된다. 이 중에서 원수의 수질이나 기후는 우리나라 전체에 걸쳐 큰 차이가 없다고 볼 수 있으므로 각 홍수터에서의 출수대 설계에서 가장 중요한 요소는 토양의 투수특성이라 할 것이다. 투수특성은 지표에서의 침투율을 결정하는 중요한 인자이고 우리나라의 홍수터는 지역에 따라 상당히 다른 투수특성을 가지고 있기 때문이다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 투수계수가 다른 여러 홍수터 토양에 대해 다양한 범람/휴지시간을 적용하는 모래통 실험과 홍수터 현장에서의 출수대 유출실험을 통해 침투율을 극대화하는 범람/휴지의 최적 지속시간과 출수대의 설계요소 즉, 설치간격과 유출유량의 최적치를 결정하는데 필요한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 범람/휴지 실험

이 실험은 토양의 투수계수별로 침투율이 극대화되는 범람/휴지시간을 파악하기 위함으로 토양표면에서 여러 가지의 지속시간으로 휴지와 범람을 반복하면서 침투율을 관측하였다. 이를 위해 경산시 남천하수종말처리장에 시험조를 설치하였으며, 시험조는 위쪽이 열려있는 내경 126 cm, 높이 126 cm인 원통형 플라스틱 용기를 이용하였다. 시험조의 바닥에는 배수구를 설치하고 여기에 줄눈이 다수 설치된 외경 2.5 cm, 두께 2 mm인 PVC관을 쪼자 형태로 연결하여 배수를 위한 집수관으로 사용하였으며, 직경 1.5~2.0 cm 크기의 자갈을 10 cm 두께로 깔고 이 위에 부직포를 깔 후 다시 홍수터 토양을 105 cm 깊이로 채웠다. 시험조의 측면 바닥에 직경 1 cm의 구멍을 뚫고 여기에 투명한 비닐튜브를 연결하여 연직 방향으로 세워서 시험조 바닥에서의 압력수두를 관측할 수 있도록 마노미터를 설치하였다. 토양은 낙동강의 상류, 중류 그리고 하류 지점인 상주(상주시 도남동), 대구(달성군 구지면) 그리고 물금(양산시 물금면) 지점에서 얻었으며, 상주토양에 대한 실험이 완료된 후 대구와 물금 토양의 순서로 실험하였다. 시험조에 토양을 채운 후 5일간 원수인 하수처리장 방류수(2차 처리수)를 토양표면에 범람시켜서 토양층 통과 후 배수시킴으로써 토양을 안정화했으며, 이 기간 동안 토양침하가 발생하여 토양별로 약 5~15 cm 깊이의 토양을 표면에 보충하였다. 안정화가 끝난 직후 토양의 포화투수계수를 측정하였다. 포화투수계수를 측정하기 위해서는 먼저 배수구를 막고 시험조에 원수를 채워서 시험조 바닥의 수두가 표면의 수위와 같아지도록 하였다. 그 후 토양표면에 범람을 지속하여 토양표면의 수위를 일정하게 유지하면서 배수구를 열어 여과수가 배출되도록 하였으며, 상주와 대구의 토양은 약 1시간 후 그리고 물금토양은 24시간 경과 후 토양표면의 수위와 시험조 바닥에서의 수두 차이를 유량과 함께 Darcy의 법칙에 대입하여 결정하였다. 수조바닥의 수두는 모두 10분 이내에 일정한 값으로 수렴했으며, 더 오래 기다린 것은 상주와 대구의 토양에서 여과수에 기포가 더 이상 혼합되지 않고 완전히 제거되었음을 확인하기 위해서였다. 물금토양에서는 여과수에 기포가 포함되지 않았으며, 이는 토양이 세립질이었기 때

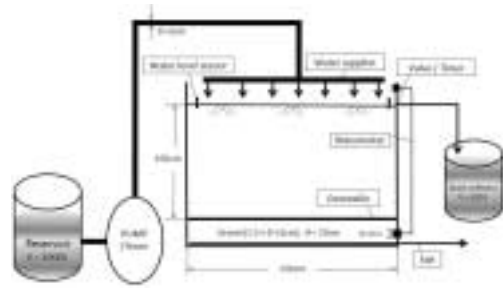


Fig. 2. Schematic diagram of the apparatus for flood/rest experiment employing sand tank.

문으로 판단되었고 토양에 잔류하는 기포는 24시간 동안 운전하여 용해에 의해 제거되도록 하였다.

시험조 표면을 범람시키기 위해서 원수를 간헐적으로 공급하였으며, 범람 동안은 수심이 약 1 cm로 감소하면 원수가 시험조의 토양표면에 유입되도록 하였고 수심이 증가하여 약 3 cm에 이르면 원수 유입이 중단되도록 수위 감지기와 펌프를 연계하는 장치를 부착하였다. 펌프는 타이머를 부착하여 범람과 휴지시간을 조절할 수 있도록 하였으며, 토양표면 높이에 배수밸브를 설치하고 그 밸브도 타이머에 연결하여 휴지가 시작되면 토양표면의 잉여수가 모두 배수되도록 하였다. 실험에는 원수 저장고와 토양표면에서 배출되는 잉여수 수집조도 사용되었으며, 각각 2,000 L와 100 L 용량이였다. 실험에 사용된 장치의 개요도는 Fig. 2에 나타내었고, 원수인 하수처리장 방류수의 수질자료는 Table 1에 나타내었다.

토양을 안정화시킨 후 범람/휴지 실험을 수행하였으며, 상주, 대구, 물금의 토양에 대해서 각각 7일, 16일, 그리고 8일씩 진행하였다. 실험방법은 시험조에서 휴지시간을 일정하게 고정하고 범람시간은 여러 가지로 변화시키면서 각 조합별로 범람시간 동안의 평균 침투율을 관측하였다. 침투율은 원수 저장고와 잉여수 수집조에서의 물 수지에 의해서 계산하였다. 시험된 휴지/범람시간 조합은 Table 2에 나타내었다. 각 토양에 대한 실험이 완료된 후 범람/휴지실험 동안의 원수 여과로 인한 투수계수 변화를 파악하기 위해 각 토양에 대해 포화투수계수를 다시 측정하였으며, 물금토양에 대해서는 범람/휴지

Table 1. characteristics of the effluent from the Gyeongsan wastewater treatment plant

Date	'08/11/01~'09/2/20
Water temperature (°C)	15.5~21.2
pH	6.0~6.8
BOD (mg/L)	>1.5
COD (mg/L)	7.5~13.9
SS (mg/L)	1.0~5.5
T-N (mg/L)	6.7~12.6
T-P (mg/L)	0.9~1.7

Table 2. Combinations of flood/rest periods performed in the sand-tank experiment (unit : min)

Site	Rest period	Flood period
Sangju	10	1, 2, 5, 10
	15	1, 2, 5, 10, 15, 20
	20	1, 2, 5, 10, 15, 20
	30	1, 2, 5, 10
Daegu, Mulgeum	15	7.5, 15, 22.5, 30, 45, 60
	30	15, 30, 45, 60, 90, 120
	60	30, 60, 90, 120

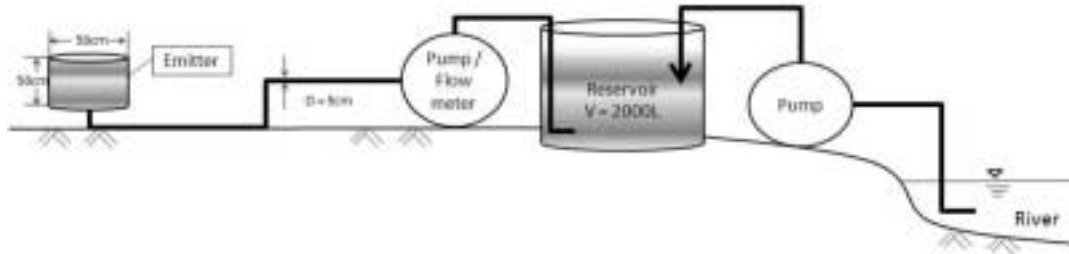


Fig. 3. Schematization of the experimental apparatus for raw-water supply to floodplain.

실험기간 동안에도 매일 실험 전에 투수계수를 측정하였다. 투수계수 측정방법은 안정화 직후 수행한 측정법과 같았다.

투수계수가 작은 대구 및 물금 지점의 홍수터 토양에 대한 실험에서는 범람시 토양으로의 물 유입에 따른 토양가스의 배출을 자유롭게 하기 위해서 시험조에 배기구를 설치하였으며, 이는 내경 5 cm인 PVC관을 시험조의 안쪽 벽면에 밀착하여 연직으로 세우고 여기에 토양표면으로부터 26 cm, 54 cm 지점에 내경 2 cm, 길이 110 cm인 끝이 막힌 PVC관을 시험조의 중심방향으로 수평으로 연결한 것이다. 수평관은 아래쪽에 10 cm 간격으로 직경 5 mm의 구멍을 다수 뚫어 공기의 유출입이 가능하도록 하였다. 한편, 상주 지점의 모래는 투수계수가 매우 커서 배기구가 없어도 범람시간 동안 토양가스가 토양표면에서 지속적으로 유출됨을 볼 수 있었다.

## 2.2. 출수대 유출실험

이 실험은 토양의 투수계수에 따라 출수대의 설치간격과 유출유량, 유출지속시간 등 홍수터여과의 설계요소와 홍수터여과의 용량결정에 필요한 기초실험으로, 투수계수가 다른 홍수터 4개 지점을 선정하여 현장에 출수대를 설치하고, 여러 가지 유출유량에 대한 범람반경과 범람반경에 도달하기 위한 유출지속시간을 관측하였다. 선정된 홍수터는 낙동강의 김해(생림면 판섬), 대구(달성군 구지면), 구미(임수동), 그리고 상주(도남동) 지점들로 포화투수계수는 각각 13 m/day, 16 m/day, 107 m/day, 그리고 200 m/day 이었다. 포화투수계수는 원관형 부압침투계를 이용하여 출수대 설치지점에서 측정하였으며, 이 지점들은 우리나라 전체의 홍수터 토양의

포화투수계수 범위를 고려하여 선정하였다. 범람/휴지 실험에 사용된 세립토는 낙동강의 물금지점에서 얻었으나 이 지역은 활발한 경작으로 인해 시험장소를 찾을 수 없어 가까운 지역인 김해시 생림면 소재 판섬으로 선정하였다. 구미지점은 범람/휴지 실험에서는 포함되지 않았으나 대구지점과 상주지점의 투수계수 사이에 큰 차이가 있어 그 사이의 지점으로 추가하였다.

이 실험을 위해서는 먼저 지표면을 평평하게 고른 후 2,000 L들이 저수조에 낙동강의 하천수를 채웠다. 사용된 낙동강의 수질은 Table 3에 나타내었다. 내경 50 cm, 높이 50 cm이고 한 쪽이 막힌 원통형 PVC용기의 열린 쪽을 상향으로 하여 연직으로 세워서 이를 출수대로 사용하였다. 내경 10 cm인 긴 튜브의 한쪽 끝은 출수대의 아래 부분에 연결하였고 다른 쪽 끝은 저수조에 연결하였으며, 튜브의 중간에 양수펌프와 유량계(세화정밀, SHW-50)를 설치하였다. 양수기는 유량조절이 가능하였으며 최대 유량은 약 400 L/min이었다. 실험장치의 개요도는 Fig. 3에 나타내었다.

출수대 유출실험은 먼저 작은 유량을 적용하여 이 유량으로 도달할 수 있는 범람구간의 반경과 이에 도달하는 시간을 관측하였다. 지점별로 30~60분 동안의 휴지 후 유량을 증가시켜 이 실험을 반복하는 방식으로 모두 4가지의 유량에 대해 실험하였다. 여기에 적용된 유량은 Table 4에 나타내었다. 이 실험이 끝난 후 실험에 적용된 최대유량으로 범람과 휴지를 반복하여 수행하면서 범람반경까지 도달하는데 걸리는 시간의 변화를 관측하였으며, 이때 휴지시간을 변화시켜 그 영향도 관측하였다.

Table 3. characteristic quality of the water from the Nakdong river

Site	Water temperature (°C)	pH	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
Sangju	3~9	6.9~7.6	11.7~14.7	0.8~1.8	2.8~4.8	1.8~5.9	3.4~4.9	0.1~0.3
Gumi	5~8	7.1~8.2	13.5~15.2	0.9~1.8	3.0~4.3	3.7~4.8	2.6~3.9	0.1~0.3
Daegu	2~7	8.0~9.2	14.4~16.0	3.4~5.1	6.9~9.4	12.8~21	4.3~5.9	0.2~0.4
Gimhae	2~8	8.1~8.7	13.9~15.7	3.7~5.1	8.1~10.3	16.8~21.6	3.2~4.7	0.1~0.2

### 3. 결과 및 고찰

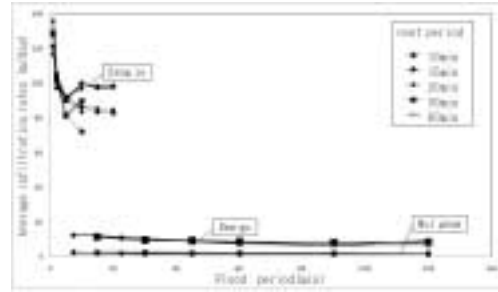
#### 3.1. 범람/휴지실험

안정화 후 측정된 시험조 토양의 투수계수는 상주, 대구 그리고 물금에 대해서 각각 323 m/day, 15 m/day, 그리고 2.0 m/day이었다. 여러 가지의 범람과 휴지시간의 조합에서 범람시간 동안의 평균 침투율을 Fig. 4의 실선으로 나타내었다. 물금과 대구의 토양에서는 대략 투수계수에 비례한 침투율을 얻었으며, 상주토양에서의 침투율이 투수계수에 비례하지 않은 것은 투수계수에 비해 시험조의 배출구 크기가 충분하지 않아 배수가 원활하지 않았기 때문으로 판단되었다. 실험시 다른 토양에서는 시험조 바닥에서의 수두가 약 5 cm이었지만 상주토양에서는 약 25 cm까지 증가하였기 때문이다. 한편, Fig. 4에서 알 수 있듯이 휴지시간의 변화에 따른 침투율 변화는 거의 없었고, 일정한 경향도 발견되지 않았다. 이는 원수의 수질이 양호하여 투수계수 감소가 크지 않았고, 휴지시간도 1시간 이내로 짧아서 투수계수에 변화를 줄 정도가 아니었기 때문으로 판단된다. 다른 연구들<sup>7~9)</sup>에서와 같이 수일-수주 동안의 긴 건조시간이 아닌 짧은 시간 동안의 휴지는 침투율 증가에 도움이 되지 않음을 알 수 있었다.

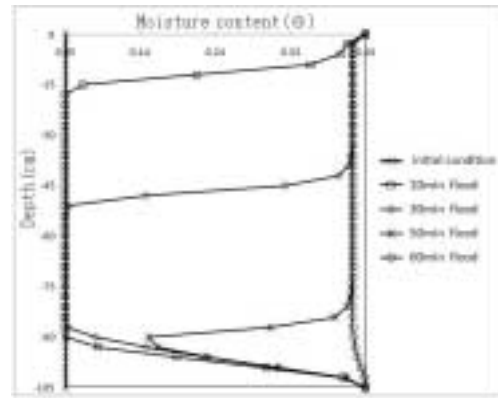
Fig. 4에서 범람시간이 길어질수록 범람시간 동안의 평균 침투율은 감소하여 일정한 값에 수렴함을 알 수 있다. 이는 Skaggs과 Nassehzdeh-Rabrizi<sup>10)</sup>의 밭 토양에 대한 연구결과와 일치하며, 범람시간이 길어질수록 불포화흐름에서의 동수경사가 감소하기 때문이다. 그러나 범람시간이 더욱 길어져서 상주, 대구의 토양에 대해 각각 약 5분과 90분이 지나면 이들 토양에서 평균 침투율이 다시 증가하며, 이는 불포화 흐름이론으로는 설명되지 않는다. 이를 이해하기 위해서 HYDRUS-1D<sup>4,6)</sup>를 이용하여 시험조 운영을 모사하였으며, 높이 105 cm인 시험조가 표면의 범람으로부터 모두 포화되는데 걸리는 시간은 상주와 대구의 토양에 대해서 각각 약 3분과 60분이었다. 따라서 물금토양에서와 달리 범람시간이 길어져서 침투율이 다시 증가한 이유는 포화전선이 지하수면에 도달하여 전체 시험조가 포화흐름영역으로 바뀌었기 때문으로 판단되었다. 시험조의 높이가 충

**Table 4.** Water supply rates in the stepwise-increase experiment

Site	Sangju	Gumi	Daegu	Gimhae
Water supply rate (L/min)	160.6	118.1	10.0	9.4
	215.8	181.3	20.3	13.7
	324.9	230.0	24.8	15.8
	378.6	343.6	35.0	18.1



**Fig. 4.** Average infiltration rates during varying flood/rest periods.



**Fig. 5.** Advances of saturation front modeled by HYDRUS-1D for floodplain soil from Daegu.

분하다고 가정하여 포화전선이 지하수면에 도달하지 않는 경우의 평균 침투율을 이들 두 토양에 대해서 HYDRUS-1D를 이용하여 구했으며 이를 Fig. 4에 점선으로 나타내었다. 대구토양에 대해서 포화전선이 범람시간에 따라 진행되는 현상을 HYDRUS-1D로 모사하는 과정은 Fig. 5에 나타내었다. 물금토양에 대한 실험에서는 이러한 현상이 발생하지 않았으며, 이는 투수계수가 작고 따라서 물 흐름 속도가 작아서 실험기간 동안 포화흐름이 형성되지 않았기 때문으로 판단된다.

토양전체를 포화흐름으로 유지하면 토양으로의 침투율을 증가시킬 수는 있지만, 토양가스의 교환이 저조해서 토양을 호기환경으로 유지하여 오염물의 빠른 분해를 도모하기에는 불리하므로 여과거리가 짧은 홍수터여과 운영에서 바람직한 방식은 아니라고 할 것이다. 다만, 여과거리가 5 m 정도로 제한되어야 하는 하상여과와 달리 홍수터여과에서는 여과거리가 10 m 또는 그 이상으로도 증가시킬 수 있으므로 탈질 등 다른 필요가 있는 경우에는 범람을 충분히 하여 이러한 포화흐름의 특성을 이용할 수도 있을 것이다.

홍수터여과의 용량은 범람과 휴지를 포함한 전체기간 동안의 일평균 침투율로 파악하여야 할 것이며, 이는 Fig. 4의

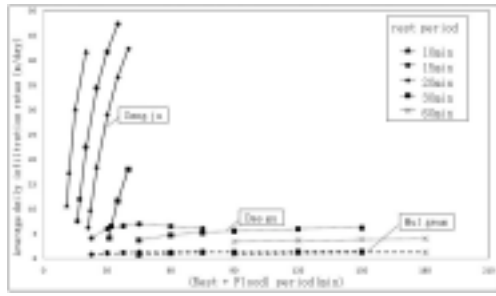


Fig. 6. Average daily infiltration rates for various flood/rest periods.

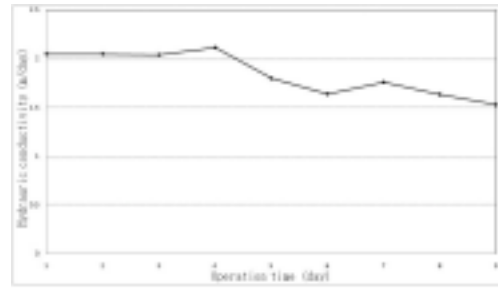


Fig. 7. Hydraulic conductivity reduction of Mulgeum soil during flood/rest experiment.

불포화흐름곡선을 이용하여 구했고 Fig. 6에 나타내었다. 범람시간이 짧으면 범람시간 동안의 평균 침투율은 높지만 휴지시간까지를 포함한 일평균 침투율은 범람시간이 길수록 증가한다. 그러나 범람시간이 일정치 이상으로 길어지면 일평균 침투율은 더 이상 증가하지 않고 일정한 값에 수렴하며 이는 범람시간이 증가함에 따라 Fig. 4에서와 같이 범람시간 동안의 침투율이 감소하여 일정한 값에 수렴할 뿐 아니라 (범람시간)/(휴지+범람시간)의 비율도 점차 증가하여 1에 수렴하기 때문이다. 본 실험에서 대구와 물금 토양의 경우 이 경향이 뚜렷하며, 상주토양의 경우 범람시간이 충분하지 않아 아직 수렴하지 않고 있다. 이는 홍수터여과의 운영에 중요한 자료이며, 대구토양에서 휴지시간을 15분으로 하는 경우 범람을 30분 이상으로 하더라도 일평균 처리율은 더 증가하지 않음을 나타낸다. 또한, Fig. 6에서 휴지시간이 짧아질수록 일평균 침투율은 증가함을 알 수 있다. 따라서 최대의 침투율을 얻으면서도 토양을 호기환경으로 유지하기 위해서는 짧고 잦은 범람이 유리하므로 이 곡선을 활용할 필요가 있다. 대구와 물금의 토양에 대해 휴지시간이 15분인 경우 일평균 침투율은 각각 6.3 m/day와 1.4 m/day로 각 토양의 포화투수계수인 15 m/day와 2.0 m/day의 각각 42%와 70%이어서 Bouwer 등<sup>11)</sup>이 보고한 14~20%보다 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 Bouwer 등<sup>11)</sup>의 침투율은 본 연구와 달리 침투(범람) 지속시간이 30일 이상의 장시간이었고 운전 기간도 10년 정도의 장기간 실험으로 폐색이 큰 영향을 주었기 때문으로 판단된다. 한편, 상주토양의 경우에는 토양의

침투율이 매우 커서 홍수터여과의 용량을 산정하는 제한요소는 침투율이 아니라 오염제거율이 될 것으로 판단되었다.

실험이 완료된 후 모든 토양에서 표층토의 색깔이 어둡게 변했으며, 변색층의 두께는 상주, 대구, 물금의 토양에서 각각 5 cm, 3 cm, 0.5 cm 이었다. Bouwer 등<sup>11)</sup>에 의하면 하수처리장 방류수를 10년간 인공함양으로 처리한 후에도 표토 약 5 cm에서만 유기물 함량이 증가하였다고 하고, Kanarek과 Michail<sup>8)</sup>은 하수처리장 방류수의 인공함양에서 부유물질은 토양깊이 3 cm 이상 침투하지 않았다고 하였다. 따라서 본 실험에서는 변색층에서만 폐색이 발생하였다고 보았고 이 층에서의 투수계수를 측정하였다. 실험완료 후 전체토양에 대한 연직 평균투수계수는 상주, 대구, 물금의 토양에 대해 각각 269 m/day, 10 m/day, 1.5 m/day이었으며 이 값들은 원래의 투수계수 값의 각각 83%, 68%, 75%이어서 크게 감소하지는 않았다. 전체 토양깊이를 폐색부와 원토양의 2종류로 나누어 수직다층토로 보아 폐색부의 투수계수도 결정하였으며,<sup>12)</sup> 폐색부의 투수계수는 상주, 대구, 물금의 토양에 대해 각각 62 m/day, 0.9 m/day, 0.03 m/day이어서 원래의 투수계수 값의 19%, 5.7%, 1.4%이었고, 이들 자료를 정리하여 Table 5에 나타내었다. 홍수터여과에서 토양의 투수계수가 작을수록 여과에 의한 폐색이 더 심하게 발생함을 알 수 있었다.

투수계수가 가장 작아서 토양여과로 인한 폐색의 효과가 극명한 물금토양에 대한 범람/휴지실험 도중의 투수계수 변화추이를 Fig. 7에 나타내었다. 여과에 의해 토양의 투수계수가 완전히 감소하였고 시험된 8일 동안에는 그 감소가 크지 않았다. 그러나 홍수터여과의 지속적인 운영은 폐색을 심화시켜 처리용량을 감소시킬 것으로 예상되므로 이를 예방하기 위해서는 적당한 주기로 토양을 상당한 시간 동안 완전히 건조시켜 토양의 투수계수를 회복할 필요가 있을 것이다.<sup>11,13)</sup> 그러므로 실규모 운영시 물금토양의 경우 8일간의 운전 후 일정기간의 건조를 통하여 표면의 투수계수를 회복

Table 5. Hydraulic conductivity (K) reduction of various soils in flood/rest experiment employing sand tank

site	K of original soil (m/day)	Clogged depth (cm)	K in total (m/day)	K of clogged layer (m/day)
Sangju	323	5	267	62
Daegu	15	3	10	0.9
Mulgeum	2	0.5	1.5	0.03

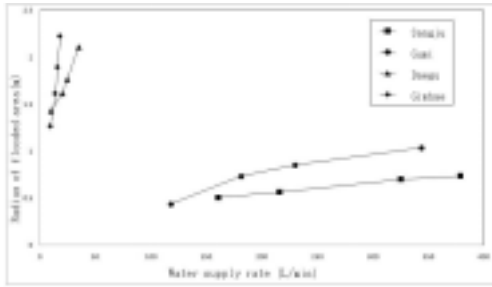


Fig. 8. Radius of flooded area according to water-supply rate.

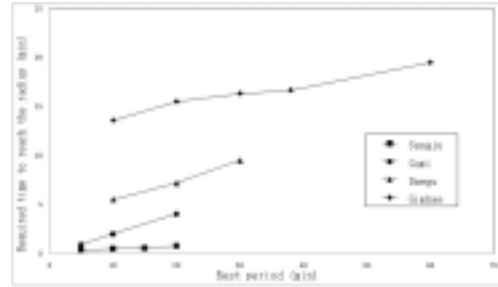


Fig. 10. Rest period vs. time to reach the flooded radius in the repeated flood/rest experiment with maximum water-supply rates shown in Fig. 8.

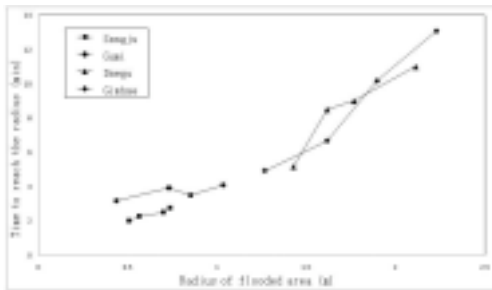


Fig. 9. Required time to reach the radius of flooded area.

시켜야 할 것이며, 최와 김의 연구<sup>4)</sup>에 의하면 우리나라 대부분의 홍수터 토양의 투수계수는 물금보다 더 크므로 8 일 이상의 운전 후 건조하여도 대용량 여과가 가능할 것으로 판단된다. 운전 기간과 건조시 필요한 시간의 조합은 추가적인 연구에 의해 결정되어야 할 것이다.

### 3.2. 출수대 유출실험

출수대에서 유출이 시작되면 범람반경은 처음에는 빨리 증가하지만 점차 감소하다 일정거리에 도달하면 멈추게 되며, 출수대의 공급유량과 이 범람반경과의 관계를 도시하면 Fig. 8이 된다. 유출유량이 증가함에 따라 범람반경은 증가하며 토양의 포화투수계수가 클수록 범람반경의 증가율은 감소하였다. 이는 침투율이 일정한 경우 범람반경이 유량의 제공근에 비례하고 침투율의 제공근에는 반비례하기 때문이다. 투수계수가 큰 상주와 구미의 경우에는 이러한 전형적인 형태를 보이고 있어 출수대의 설치간격과 공급유량 결정에 이 곡선을 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 대구와 김해의 경우에는 다른 형태를 보이고 있으며, 그 이유는 이들 지점에서는 시험한 유량이 충분하지 않았기 때문으로 판단된다. 또한, 토양표면에서의 침투율은 시간이 지남에 따라 점차 감소하며<sup>14)</sup> 투수계수가 작은 경우 이 효과는 더 커지므로 대구와 김해의 경우 이 효과에 의해 곡선이 변형되었기 때문으로 판단된다.

각 토양별로 그리고 Table 4의 유량별로 범람반경에 도달하는 시간을 Fig. 9에 나타내었다. 투수계수가 큰 상주와 구미의 토양에서는 범람반경에 빨리 도달하여 소요시간이 2~4 분에 불과함을 알 수 있다. 투수계수가 작은 대구와 김해에서 범람반경에 도달하는데 더 많은 시간이 소요되는 것으로 보이지만 이는 적용된 유량이 작았기 때문이고, 실규모 운영에서 큰 출수대 유량을 적용하는 경우 출수대에서 유출이 시작되어 범람반경까지 도달하는 시간 즉, 토양면을 완전히 적시는데 필요한 시간을 3~4분 정도로 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

각 지점별로 Fig. 8에서 적용한 최대유량으로 범람/휴지를 반복하되 휴지시간을 여러 가지로 변화시키면서 범람반경에 도달하는 시간의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 각 측점은 하나의 휴지시간에 대해 범람을 3~4회 반복 수행한 평균치를 나타낸 것이다. 이 실험에서 휴지시간을 변화시켜도 범람반경은 각 지점별로 거의 일정하여 짧은 시간의 휴지로는 토양의 침투율이 변하지 않음을 알 수 있었으며, 이는 앞의 범람/휴지실험의 결과와도 일치한다. 그러나 휴지시간이 길어짐에 따라 범람반경 도달시간은 증가하고 있으며, 이는 지표에 침투한 물이 휴지시간이 증가함에 따라 더 깊은 곳으로 이동하여 지표에서의 범람초기 침투능이 다소 회복되었기 때문으로 판단된다.<sup>12)</sup> 상주토양에서 이 효과가 미미한 것은 투수계수가 매우 커서 배수가 빨랐기 때문이다.

범람/건조 실험에는 하수처리장 방류수를 사용하였고 출수대 유출실험에서는 낙동강물을 사용하였다. 이는 실험의 편의를 위한 것이었으며 Table 1과 3에서 알 수 있듯이 그 수질이 다르므로 이로 인한 오차가 있을 것으로 판단된다. 부유물질(SS)과 BOD 등은 하수처리장 방류수 보다 하천수가 더 높지만 질소와 인 농도는 그 반대의 특성을 가지고 있어서 실규모 설계시 이에 대한 고려가 필요하리라 할 것이다.

## 4. 결론

모래통 실험결과 침투율은 대략 토양의 투수계수에 비례하였으며, 1시간 이내의 짧은 휴지에 의해서는 침투율의 변화가 거의 없었다. 범람이 길어지면 범람시간 동안의 평균 침투율은 지수함수적으로 감소하여 일정한 값에 수렴하였으나 범람/휴지를 고려한 일평균 침투율은 범람이 길어질수록 증가하여 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타냈다. 또한, 휴지시간이 짧을수록 일평균 침투율은 컸으며, 실험범위에서는 대구와 물금의 토양에서 휴지/범람이 15분/30분일 때 최대 침투율이 각각 6.3 m/day와 1.4 m/day이었고, 이 값들은 포화 투수계수 값의 42%와 70%씩이었다. 토양의 투수계수가 작을수록 여과에 의한 폐색이 더 심하게 발생하였으며, 투수계수는 완만히 감소하여 물금토양에서 8일간의 여과로 투수계수는 27%만 감소하였다.

출수대 실험결과 상주와 구미의 토양에서는 유출유량이 증가함에 따라 범람반경이 증가하며 토양의 포화투수계수가 클수록 그 증가율은 감소하는 형태를 보였다. 실험규모 운영에서 토양면을 완전히 적시는데 필요한 시간 즉, 유출 시작으로부터 범람반경에 도달하는데 필요한 시간은 3~4분 이내로 제한할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 짧은 휴지시간을 적용하는 현장 출수대 실험에서 휴지시간이 증가함에 따라 범람초기의 침투율은 다소 회복되었으나 전체 범람시간 동안의 침투율에는 변화가 거의 없었다.

KSEE

## 사 사

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

## 참고문헌

1. 환경관리공단, "하천자연정화 시설부지 및 수질현황 조사서," (1999).
2. 김승현, 정장식, "하상여과를 이용한 금호강 수질개선연구," 환경

연구 영남대학교 환경문제연구소 논문집, **18**(2), (1999).

3. 김승현, "우리나라에서 강변여과와 하상여과의 비교," 대한환경공학회지, **29**(10), 1154~1162(2007).
4. 최명호, 김경수, 김승현, "우리나라에서 홍수터여과의 가능성에 대한 기초조사," 대한환경공학회지, **31**(1), 70~78(2009).
5. Jong-Bae Chung., Seung-Hyun Kim., Byeong-Ryong Jeong., and Young-Deuk Lee., "Removal of organic matter and nitrogen from river water in a model floodplain filtration," *J. Environ. Qual.*, **33**, 1017~1023(2004).
6. 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).
7. Pescod, M. B., "Wastewater treatment and use in agriculture-FAO irrigation and drainage paper 47, FAO, Rome, (1992).
8. Kanarek, A., and Michail, M., "Groundwater recharge with municipal effluent: DAN region reclamation project, Israel," *Water Sci. Technol.*, **34**, (1996).
9. 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**, (1974).
10. Skaggs, R. W., and Nassehzdeh-Rabrizi, A., "Drainage Systems for Land Treatment of Wastewater," *J. Irrigation and Drainage*, **108**, (1982).
11. Bouwer, H., Rice, R. C., Lance, J. C., and Gilbert, R. G., "Rapid-infiltration research at Flushing Meadows Project, Arizona," *J. WPCF*, **52**, (1980).
12. Fetter, C. W., "Applied Hydrgeology," Macmillan College Publishing Company, Inc., New York, USA, (1994).
13. Todd, D. K., "Ground Water Hydrology," John Wiley & Sons, Inc., (1959).
14. Linsley, R. K., and Franzini, J. B., "Water-Resources Engineering," 3<sup>rd</sup> ed., McGraw-Hill, Singapore, (1979).