

다목적 여과저류지에서 여과수의 산출율과 수질개선에 관한 실험연구

An Experimental Study on the Production Rate and Contaminant Removal of Filtrate in Multi-purpose Filtration Pond

정재민 · 최홍규* · 정관수** · 김승현†

Jae-Min Jeong · Hong-Gyu Choi* · Kwan-Sue Jung** · Seung-Hyun Kim †

영남대학교 환경공학과 · *수자원기술 · **충남대학교 토목공학과

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

*Water Resources Engineering Corporation

**Department of Civil Engineering, Chungnam National University

(2013년 6월 5일 접수, 2013년 7월 30일 채택)

Abstract : A pilot-scale test-bed was operated employing three soils with different grain sizes dredged from the Nakdong River to obtain the design and operation parameters of the multi-purpose filtration pond, such as the filtrate productivity of the filter sand, the appropriate removal period of the surface clogging and the contaminant removal efficiency. The cross-flow velocities were applied stepwise ranging from 0 to 40 cm/sec in order to simulate the various velocities in the artificial stream of the pond. Results showed that a filtrate production rate of 5~3 m³/m²-day was maintained by removing the surface clogging every 7 to 13 days and that the filtrate quality was not affected by the factors of the filtrate production rate, the grain size of the filter sand and the cross-flow velocity. Results also showed that most of the removal occurred within 50 cm of the top soil and that the removal efficiencies with the filtration distance of 2.4 m were 80~95% for turbidity, 20~30% for COD, 75~90% for BOD, 5~20% for total nitrogen and 20~60% for total phosphorus, which suggested that particulate matters had a high removal efficiency.

Key Words : Multi-Purpose Filtration Pond, Pilot-Scale, Cross-Flow Velocity, Filtration Rate, Water Quality Improvement

요약 : 다목적 여과저류지에서 모래여재의 여과수 여과능, 적절한 표층폐색 제거주기 그리고 오염제거효율 등 설계와 운영 요소를 파악하기 위하여 서로 다른 3가지 입径의 낙동강 준설토를 채운 파일럿 규모의 테스트베드를 운영하였으며, 여과저류지에서의 다양한 인공하천의 유속을 모사하기 위하여 표류수 유속을 0~40 cm/sec로 단계적으로 변화시켰다. 운영결과 여재표층의 슬러지를 7~13일의 주기로 제거함으로써 여과수량을 5~3 m³/m²-day로 유지할 수 있었고, 여과수량과 여재입경 그리고 표류수 유속 등의 차이에 의한 여과수의 수질차이가 없음을 알 수 있었다. 대부분의 오염제거는 표층 50 cm 부근에서 발생함을 알 수 있었고, 여과거리 2.4 m에서의 오염제거율은 탁도 80~95%, COD 20~30%, BOD 75~90%, T-N 5~20% 그리고 T-P 20~60%로, 주로 입자성 오염물의 제거율이 높은 것으로 나타났다.

주제어 : 다목적 여과저류지, 파일럿실험, 표류수 유속, 여과수량, 수질개선

1. 서론

정부에서 역점을 두어 추진한 4대강사업이 완공됨에 따라 우리나라의 대하천에 큰 변화가 불가피하고, 이에 따른 여러 가지 긍정적 효과뿐 아니라 부정적인 영향도 있을 것으로 예상된다. 특히 하천의 어떤 곳이든지 쉽게 접근할 수 있도록 하천주변이 정비되고 담수량이 많아져서 하천주변에 정주인구가 증가하고 친수활동도 증가할 것으로 기대된다. 이러한 긍정적인 효과를 극대화하기 위해서는 용이한 접근성과 충분한 담수량에 더하여 하천의 수질 또한 충분히 좋아야 할 것이다. 그러나 이 사업의 결과로 하천의 유수 단면적이 크게 증가하여 유속이 느려져서 하천의 수질보전이 이 사업 이전보다 더 어려워질 가능성이 커졌다고 할 수 있다(경남도민일보, 2012년 6월 29일자).

이와 같이 변화한 환경에서 하천의 수질보전을 위해서는

환경규제를 강화하거나 환경설비를 확충하는 등의 노력이 필요할 것이다. 그러나 여기에는 막대한 예산과 노력 그리고 적지 않은 시간이 필요할 것이므로 이를 추진하되 지금까지의 접근법과는 달리 하천수를 직접 처리하여 그 수질을 개선하는 노력의 병행도 필요할 것으로 판단된다. 이러한 새로운 접근법은 기존의 유입원 관리에 비해 그 효과가 직접적이고 가시적인 특징이 있으므로 투자대비 효율을 극대화하기 위해서는 그 도입이 매우 필요한 것으로 판단된다. 그러나 대하천의 하천수를 기존의 수처리방식으로 직접 처리하여 하천수질을 개선하는 것은 쉽지 않다 할 것이다. 그 양이 방대하고 또한 오염농도가 낮아서 수처리효율이 낮기 때문이다. 따라서 이러한 낮은 농도의 대량 수처리에는 기존의 하이테크(high-tech) 공법보다는 로텍(Low-tech) 공법의 적용이 바람직할 수 있으며 그 중 하나가 다목적 여과저류지이다.¹⁾

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

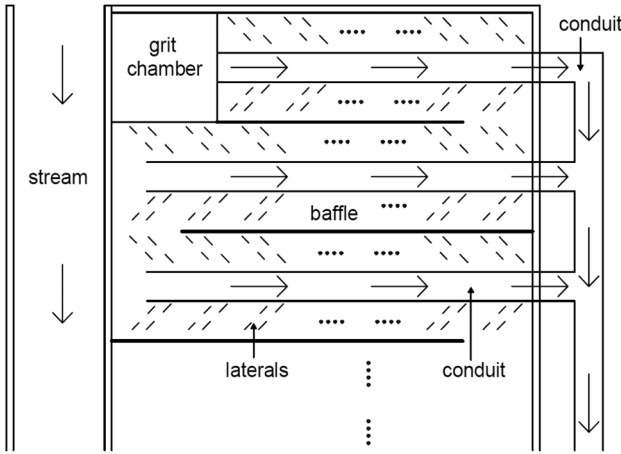


Fig. 1. Schematic diagram of multi-purpose filtration pond.

다목적 여과저류지는 4대강사업으로 하천변에 조성되는 저류지를 활용하는 것으로, 바닥의 일정깊이를 투수성이 좋은 토양으로 치환하고 그 위에 인공하천을 조성하여 하상 여과를 적용함으로써 깨끗한 여과수를 생산하는 방식이다.¹⁾ 투수성이 좋은 치환토를 사용하므로 4 m³/m²-day 정도의 큰 여과수량을 얻을 수 있을 것으로 예상되며, 이 여과수량을 적용하면 여과저류지 1 km²에서 하루에 4,000,000 m³의 거대용량의 여과수를 얻을 수 있어서 대하천의 하천수도 정화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 이 설비는 홍수시에는 하류의 범람예방을 위한 저류기능을 일부 가질 수 있으며, 하천에 오염사고 발생시에도 이의 영향을 받지 않은 하천수를 저류함으로써 비상용수를 확보할 뿐 아니라 비상시에도 깨끗한 여과수를 공급하는 장점도 가진다. 다목적 여과저류지의 개요도는 Fig. 1에 나타내었다.

다목적 여과저류지에 조성된 인공하천에서의 하상여과는 자연하천에서의 하상여과와 몇 가지 차이가 있다. 가장 큰 차이는 여과저류지에서는 하상 단위면적당 여과수량을 크게 유지하기 위해 하상의 폐색을 주기적으로 제거한다는 점이고, 둘째는 여과저류지 내부에 설치되는 수 km에 이르는 인공하천의 최상류에서는 하루 유량이 백만 m³ 이상에 이르고 그 유속도 빠르지만 하류로 갈수록 그 흐름유량과 유속이 감소하여 최하류에서는 흐름이 거의 없는 부등정류라는 점이며, 이외에도 인공하천에서는 하상의 투수계수, 표류수의 유속 등을 인위적으로 조절할 수 있는 점이 다르다. 또한, 자연하천의 하상여과에서는 우물 자체의 유지관리 이외에 대수층에 대한 관리나 인위적 조작용은 필요하지 않다. 그러나 여과저류지에서는 그 설계와 운영시 하상폐색의 제거 주기에 대한 이해가 필요하며, 모래의 투수계수와 표류수 유속변화에 따른 여과수량과 수질개선에 대한 이해도 필요하다. 일반적으로 투수계수가 크면 여과수량은 크지만 여과수의 수질개선은 저조하며, 표류수 유속이 크면 폐색발달이 저해되어 여과수량은 크게 감소하지 않지만²⁾ 여과수의 수질개선효과는 감소한다고 알려졌기 때문이다.³⁾ 한편, 지금까지 세계적으로 강변/하상여과분야의 연구는 표류수 흐

름을 고려하지 않은 여과수의 수질개선에 집중되었고,^{4,8)} 하상여과에서 폐색으로 인한 여과수량 감소에 대한 연구⁹⁾는 수행된 바 있으나 표류수의 흐름이 없는 칼럼실험을 통한 연구여서 한계가 있으며 이에 관한 외국에서의 연구는 아직 보고된 바 없는 실정이다.

본 연구에서는 다목적 여과저류지의 여과수량과 여과수질에 관한 설계 및 운영인자를 얻기 위하여, 여과저류지에 설치되는 인공하천에서의 하상여과를 모사하는 파일럿 규모의 설비를 운영하되, 여재의 입경이 서로 다른 인공하천 구간들을 조성하고 여기에 여러 표류수 흐름유속을 적용하여 여과수량과 여과수질 변화를 관측하고 그 결과를 해석한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 실험장치

실험장치로 사용하기 위해 길이 6 m, 폭 4.5 m인 평평한 바닥면에 벽면의 높이가 3.0 m이고 윗면이 없는 직육면체의 철재 구조물을 제작하였다. 이 구조물의 내부에 길이 6 m, 높이 2.8 m인 철재 격벽을 구조물의 길이방향으로 연직으로 세워서 평행하게 1.5 m 간격으로 2개 설치하여 3조의 유수조를 제작하였다. 각 유수조에는 여재(모래)를 2.5 m 높이까지 채웠으며, 격벽의 끝 부분 1.5 m 길이 구간에서 여재표면보다 위로 돌출한 격벽부분을 제거하되 두 격벽의 제거된 부분이 구조물의 서로 다른 끝에 엇갈려 위치하도록 하였다. 이는 3조의 유수조가 직렬로 연결되어, 각 유수조의 끝 부분에서 U자 형태로 표류수의 흐름방향이 바뀌어 전체적으로는 Fig. 1에서와 같이 지그재그 형태로 흐르는 하나의 인공하천을 형성하도록 하기 위함이었다. 여기서 인공하천 즉, 여재표면의 경사는 두지 않았다. 인공하천의 최상류 50 cm 길이 구간은 유입수 유입을 위한 설비로 여재표면에서 5 cm 높이로 월류언을 설치하여 유수를 공급하게 하였고, 최하류에는 인공하천의 수심을 조절할 수 있도록 높이조절이 가능한 월류언을 설치하였다. 따라서 최상류 유수조는 그 길이가 5.5 m로 다른 두 유수조들보다 0.5 m 짧았다.

유수조의 하류측 끝에는 길이 1.0 m, 폭 4.5 m 그리고 높이 3.0 m인 저류조를 1조 설치하되 3조의 유수조 전체폭에 일치하도록 밀착시켰고, 여기에 유수조의 최하류 월류언을 넘은 표류수가 흘러 들도록 하였다. 이 저류조에 흘러든 표류수를 양수하여 유수조의 최상류 월류언으로 송수한 후 새로 보충되는 원수와 합쳐 재사용함으로써 원수 사용량을 줄이도록 하였다. 이때 재사용을 위해 양수되는 유량을 조절할 수 있도록 하여 유수조에서 표류수의 유량조절이 가능하도록 하였다.

각 유수조에는 수평집수관을 1개씩 설치하였다. 집수관의 설치위치는 유수조의 바닥면에서 10 cm, 그리고 한쪽 격벽에서 10 cm만큼 떨어진 곳이 집수관의 중심이 되도록 하였고,¹⁰⁾ 유수조의 길이방향으로 전체길이에 걸쳐도록 하였다.

집수관은 두께 4 mm인 폴리에틸렌 파이프로 제작하였고, 내경은 유수조별로 43~70 mm였으며, 개공율은 모두 20%로 제작하였다. 따라서 여과수의 집수관 유입시 저항은 문제되지 않을 것으로 계산되었으며,¹⁰⁾ 집수관 내부를 여과수가 흐르면서 발생하는 마찰손실수두도 13 cm 이하로 제한되어 집수관 전체 길이에 걸쳐서 여과수가 비교적 골고루 유입되도록 하였다.^{11,12)}

수평집수관에 흘러든 여과수는 집수조에서 수집하여 최종적으로 배수하였다. 집수조는 순환수조에 인접하여 설치하였으며, 그 규격은 길이 1.0 m, 폭 1.5 m, 높이는 3.0 m로 하였고, 각 유수조별로 1정씩 모두 3조를 설치하였다. 수평집수관이 저류조를 통과하는 1.0 m 구간은 무공관으로 처리하였다. 각 집수조에는 내경 6.5 cm의 개폐식 원형 배수구를 7공씩 설치하였으며, 각 배수구의 중심의 위치는 모든 집수조에서 바닥면으로부터 2.50 m, 2.25 m, 2.00 m, 1.75 m, 1.50 m, 1.25 m, 1.00 m로 하였다. 본 실험장치의 주요 구성부분은 모두 두께 6 mm인 철판을 이용하였으며, 구조적인 안정을 위하여 실험장치의 최외곽에는 보강재를 추가하였다. 실험에 사용된 장치의 개요도는 Fig. 2에 나타내었다.

각 유수조에 채운 여재는 4대강사업에서 얻은 낙동강의 준설토였으며, 상류 유수조로부터 조립질, 중립질, 그리고 세립질 준설토를 채웠다. 조립질 준설토는 칠곡군 석적읍에서, 중립질은 구미시 해평면에서 그리고 세립질은 성주군 선남면에서 얻었다. 각 준설토의 입도분포는 Fig. 3에 나타내었다. 각 유수조의 여재층에는 시료채취구를 설치하였으며, 이는 내경 2 mm, 두께 0.5 mm인 비닐튜브를 사용하였다. 시료채취구의 평면도상 설치위치는 각 유수조의 전체길이 중 중간지점이었고, 집수관 상부에서 깊이 방향으로 50 cm 간

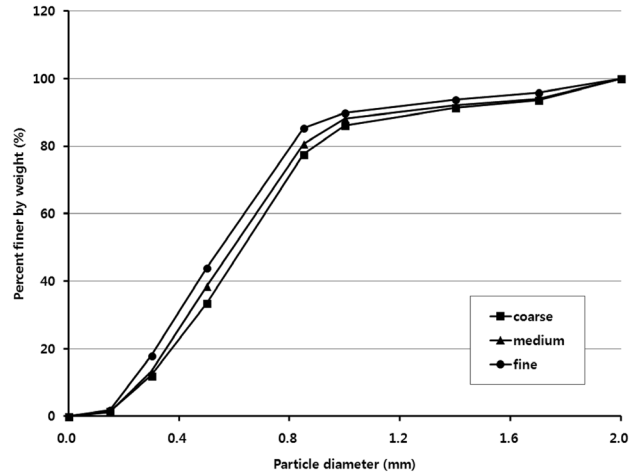


Fig. 3. Grain size distribution of the soil used in the experiment.

격으로 설치하였다. 따라서 시료채취구의 위치는 모래표면으로부터 50 cm, 100 cm, 150 cm, 200 cm, 그리고 240 cm 지점이었다. 또한, 집수조에 연결된 수평집수관의 내부에 시료채취를 위한 비닐튜브를 찢어 넣어 집수조에 저장된 여과수와 섞이지 않은 여과수 시료를 얻도록 하였다.

2.2. 실험방법

실험장치는 한국수자원공사 고령권 관리단의 정수장 부지에 설치하였다. 실험장치를 제작한 후 본실험 이전에 수돗물을 이용한 안정화 실험을 수행하였으며, 집수조에 수돗물을 주입하여 집수관을 통해 각 유수조로 물을 공급하였다. 유수조의 여재표면에서 40 cm 높이에 수위가 도달한 후 집수조의 배수구를 통해 각 유수조에 유입된 물을 모두 배

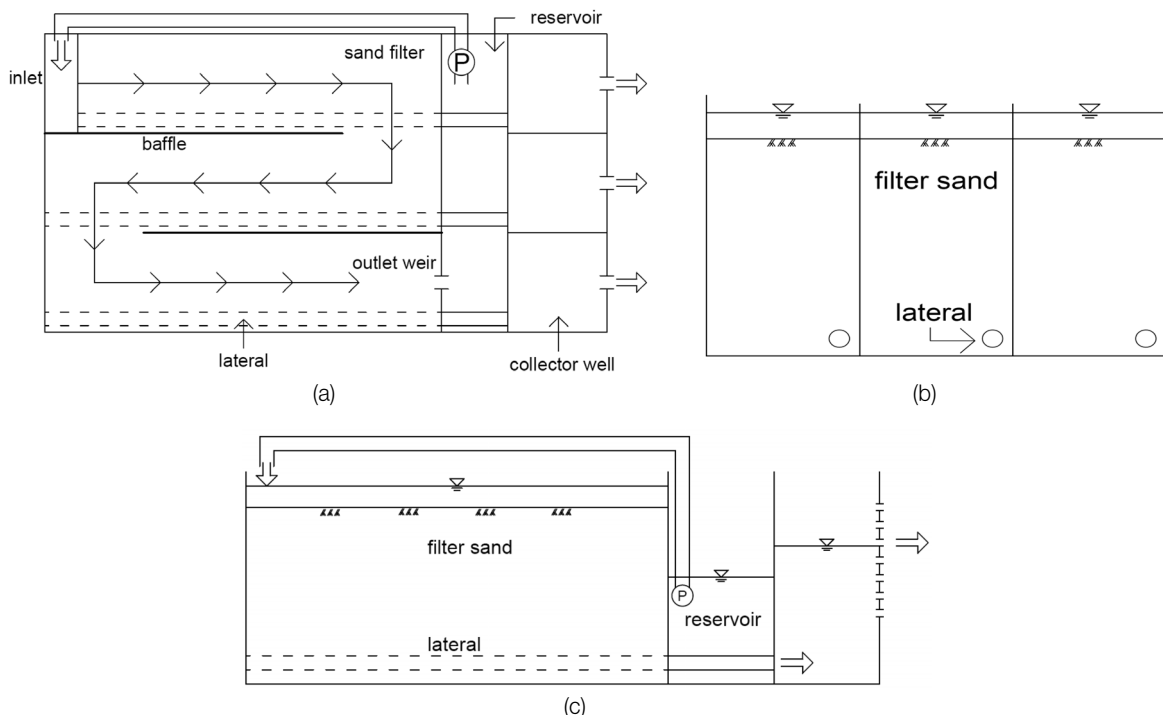


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus: (a) plan view, (b) cross sectional view and (c) side view.

제하였다. 이 과정에서 여재의 침하가 발생하였으며 이를 3회 반복하여 더 이상의 여재침하가 발생하지 않는 것을 확인하고 각 유수조의 투수계수를 측정하였다. 투수계수 결정을 위해 집수조를 통해 유수조에 수돗물을 공급하여 유수조의 2.75 m 높이까지 수위를 높인 후 집수조를 통한 물 공급을 중단하고 유수조의 상류측 월류언을 통해 물을 공급하여 유수조의 수위를 그대로 유지하면서 집수조의 배수구를 열어 여과수량을 측정하였다. 이때 각 유수조의 여과수량은 조립조, 중립조, 세립조에 대해서 각각 50.63 m³/day, 57.34 m³/day, 46.29 m³/day이었고, 집수조의 배구수 높이는 조립조에서 2.25 m, 그리고 중세립조에서는 모두 2.00 m였다.

투수계수 측정 후 본실험을 수행하였으며 이때부터 정수장의 유입원수를 실험용 원수로 사용하였다. 이 정수장은 고령군 다산면의 낙동강 우안에서 취수하고 있다. 본실험에서는 유수조 표류수의 흐름유속을 최상류 기준 2 cm/sec, 10 cm/sec, 20 cm/sec, 30 cm/sec, 40 cm/sec 그리고 무유속의 순서로 단계적으로 변화시켰으며, 각 표류수 유속에서 여과수량이 5 m³/m²-day에서 시작하여 3 m³/m²-day까지 감소하면 운전중을 종료하고 다음 단계의 표류수 유속실험으로 넘어갔다. 하나의 표류수 유속에 대한 실험이 완료되고, 다음 단계의 표류수 유속실험으로 넘어가기 전에 표층의 폐색을 제거하였다. 폐색제거는 갈퀴를 이용한 기계적 제거법을 적용하였고 표층 약 5 cm를 교란하여 표층에 형성된 폐색 슬러지를 표류수에 흘트려서 유수조 밖으로 내보냈다. 갈퀴를 이용한 폐색제거는 효과적이어서 폐색제거 후 여과수량은 원상태로 회복되었다. 표류수 유속 30 cm/sec부터는 유사이송을 방지하기 위하여 표층에 13 mm 입径의 자갈을 3 cm 두께로 덮었다.

원수와 각 입경별 최종 여과수의 탁도 및 여과수량은 매일 관측하였다. 모든 표류수 유속에서 각 입경별로 여과수량이 5 m³/m²-day, 4 m³/m²-day, 3 m³/m²-day일 때 각 유수조의 모든 시료채취구에서 수질분석을 위한 시료를 채취하였다. 여과수량이 5 m³/m²-day와 3 m³/m²-day일 때에는 시료의 COD_{cr}, 탁도, T-N, T-P를 분석하였으며, 여과수량이 4 m³/m²-day일 때에는 앞의 항목에 NH₄-N, NO₃-N, PO₄-P 그리고 BOD를 추가하였다. 유량은 스톱워치와 매스실린더를 이용하여 측정하였다. BOD는 Standard Method¹³⁾에 의해서, 탁도는 LP2000 (Hanna사, 이태리)에 의해서, 그리고 나머지 수질항목들은 HS-3100 Water Analyzer(휴마스사, 대한민국)로 분석하였으며, 시료당 3회 분석하여 평균을 취하였다. 실험은 2012년 10월 1일부터 2013년 5월 4일까지 동절기를 제외한 기간에 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

투수계수 결정을 위한 실험에서 얻은 유수조의 표류수와 각 집수정의 수위차 그리고 수평집수관에서의 여과수량을 MODFLOW¹⁴⁾에 적용하여 각 유수조에 채운 여재의 투수계

수를 구했으며, 조립조, 중립조, 세립조에 대해서 각각 37.0, 25.4, 20.8 m/day이었다. MODFLOW 운영시 적용한 블록의 크기는 50 × 50 × 50 cm였고, 관측된 수위차에서 관측된 여과수량을 주는 투수계수를 시행착오법으로 구했다. 낙동강의 중류와 상류에서 얻은 준설토의 투수계수가 크게 다르지 않음을 알 수 있었다.

유수조 운전시 각 집수조의 수위를 조절하여 여재입경에 따른 여과수량의 차이를 최소화하였다. 각 표류수 유속에서 운전시간에 따른 여과수량 변화를 관측한 결과 모든 표류수 유속과 입경에서 운전시간에 따라 여과수량이 선형으로 감소하여 유사한 양상을 보였으나 각 표류수 유속별로 여과수량이 5 m³/m²-day에서 3 m³/m²-day까지 도달하는데 걸리는 시간은 상당한 차이가 있었다. 하나의 예로 표류수 유속 30 cm/sec의 운전에서 각 입경별로 시간경과에 따른 여과수량 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 이 운전에서 표류수 수심은 10 cm였으며, 조립조의 수위는 2.25 m에서 시작하여 운전 4일째 1.75 m로 낮추었고, 중세립조의 수위는 2.0 m에서 시작하여 운전 3일째 1.5 m로 낮추어 운전하였다. 여과수량은 입경에 상관없이 거의 선형으로 감소하여 운전시작 7일 후 3 m³/m²-day에 도달하였다. 모든 운전에서 집수조의 수위는 항상 1.5 m 이상으로 유지하였으며, 이는 표류수와 수위차가 커지면 여재층에 공기가 유입되어 여과수량이 급속히 감소할 수 있기 때문이었다. 여러 표류수 유속에서 여과수량이 5 m³/m²-day에서 3 m³/m²-day로 감소하는데 소요되는 시간을 Table 1에 나타내었으며, 본 실험조건에서는

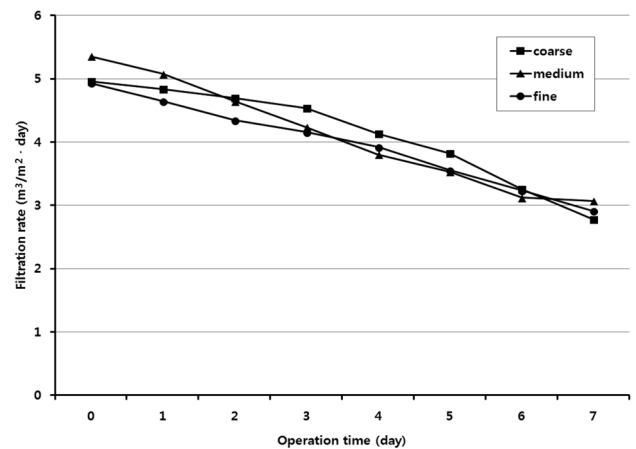


Fig. 4. Production rate change with operation time according to the grain size (cross-flow velocity 30 cm/sec).

Table 1. Operation time required to reach 3 m³/m²-day for various cross-flow velocities

Cross-flow velocity (cm/sec)	2	10	20	30	40	0
Required time to reach 3 m ³ /m ² -day(days)	13	10	13	7	8	8
Turbidity captured in the coarse sand*	446	206	324	312	211	222

*Turbidity captured in the coarse sand : turbidity difference between raw water and filtrate multiplied by the amount of filtrate during the operation

여과수량 감소에 대한 표류수 유속의 영향은 없는 것으로 나타났다. 이는 본 실험에 적용한 표류수 유속의 최대치인 40 cm/sec까지는 표층의 소류력이 충분하지 않기 때문으로 판단되었고, 강변여과에서 90 cm/sec 이하의 하천유속에서는 하상에 폐색이 발달한다는 보고와 부합하는 결과이다.²⁾ Table 1에는 각 표류수 유속별 운전에서 조립조에서 포획된 탁도의 총량도 나타내었다. 표류수 유속 2 cm/sec에서의 높은 탁도포획량은 깨끗한 여재의 내부폐색이 발달하는 과정을 나타내는 것으로 볼 수 있고, 나머지 표류수 유속에서는 포획된 탁도가 200~320 정도에 도달하면 여과수량이 3 m³/m²-day에 도달함을 나타내고 있다. 포획된 탁도의 양에서 상당한 차이가 나는 것은 갈퀴를 사용한 폐색의 제거작업에서 폐색의 제거정도가 항상 같지는 않았기 때문으로 판단되었다.

운전시간에 따른 각 입경별 최종 여과수의 탁도는 표류수 유속과는 상관없이 모두 유사한 경향을 나타내었으며, 한 예로 표류수 유속 30 cm/sec에서의 관측결과를 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구의 모든 운전조건에서 탁도 제거율은 대략 80~95%였으며, 입경별 탁도 제거율은 중립조와 세립조는 서로 유사하였지만 예상과 달리 항상 조립조에서 가장 높았고 그 이유는 토양의 물리화학적 특성에 기인하는 것으로 추정되었으나 본 연구에서 자세한 원인을 밝히지는 못하였다. Fig. 6에는 표류수 유속 30 cm/sec, 여과수량 4 m³/m²-day 인 경우 각 입경별 그리고 여과깊이별 여과수의 탁도변화를 나타내었다. 대부분의 탁도제거는 표층 약 50 cm에서 발생하였으며, 본 연구의 다른 모든 운전에서도 이와 유사한 결과를 얻었다. 표층 부근에서의 이러한 탁도제거는 복류수에 대한 연구¹⁵⁾와도 일치하는 결과이다. 한편, 여과수에서 제거된 탁질은 표층 부근에 축적된 것으로 추정되었으며, 이는 표층의 폐색을 제거한 후에는 여과수량이 다시 원상태로 회복되었고, 라인강변의 Flehe 지역에 설치된 강변여과정 인근의 하상에서 표층의 폐색 슬러지층은 수 mm 두께로 그리고 내부폐색은 약 20 cm 깊이까지만 발달하였다고 하였고¹⁶⁾ 또한, 칼럼실험에서 표층폐색은 5 mm 두께로 발달하였고 내부폐색은 최대 30 cm 깊이까지만 발달하였다고 보고⁹⁾하였기 때문이다.

여과깊이별 여과수의 COD농도는 표류수 유속, 여재입경 그리고 여과수량과 무관하였고, 본 연구의 모든 경우에서 COD 제거율은 20~30% 정도였으며, 표층 약 100 cm 깊이까지에서 활발히 제거되었다. 한 예로 표류수 유속 30 cm/sec, 여과수량 4 m³/m²-day에서 각 입경 및 여과깊이별로 여과수의 COD농도를 Fig. 7에 나타내었다. 이러한 농도분포는 전형적인 토양여과의 특성을 나타낸다고 할 수 있으며, 불포화토양의 여과수에 대한 보고와 유사하고,¹⁸⁾ 복류수에서의 여과깊이에 따른 TOC농도분포와도 매우 유사한 결과이다.¹⁵⁾

여과깊이별 여과수의 BOD농도도 표류수 유속 및 여재입경과 무관한 것으로 나타났으며, 본 연구에서는 그 제거율이 75~90% 정도였고, 표층 약 50 cm에서 가장 활발히 제거되었다. 하나의 예로 표류수 유속 30 cm/sec, 여과수량 4 m³/

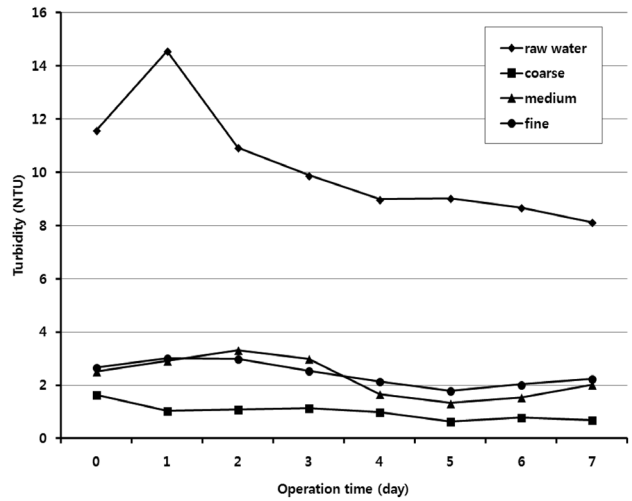


Fig. 5. Daily turbidity change of the filtrates during the experiment (cross-flow velocity 30 cm/sec).

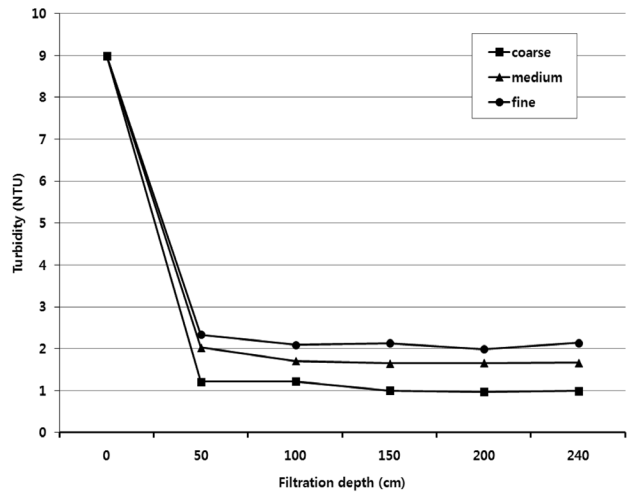


Fig. 6. Turbidity of filtrate along the filtration depth according to the grain size (cross-flow velocity 30 cm/sec, filtration rate 4 m³/m²-day).

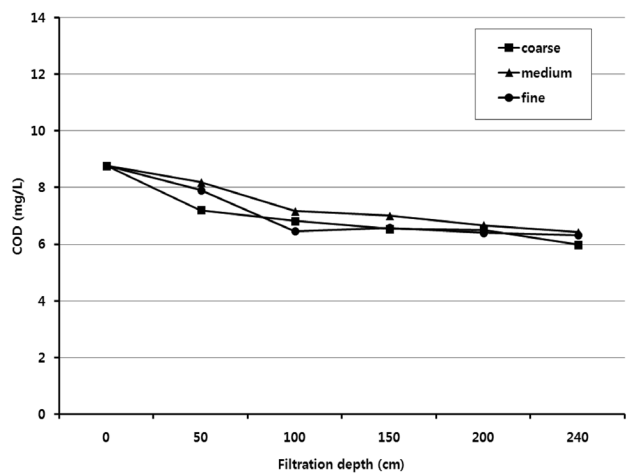


Fig. 7. Filtrate COD concentration along the filtration depth according to the grain size (cross-flow velocity 30 cm/sec, filtration rate 4 m³/m²-day).

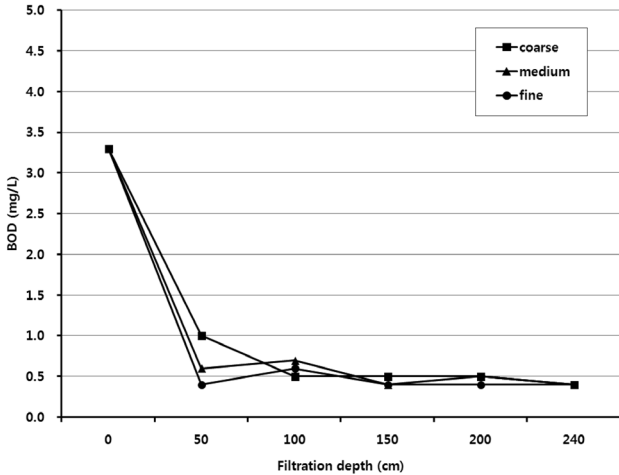


Fig. 8. Filtrate BOD concentration along the filtration depth according to the grain size (cross-flow velocity 30 cm/sec, filtration rate 4 m³/m²-day).

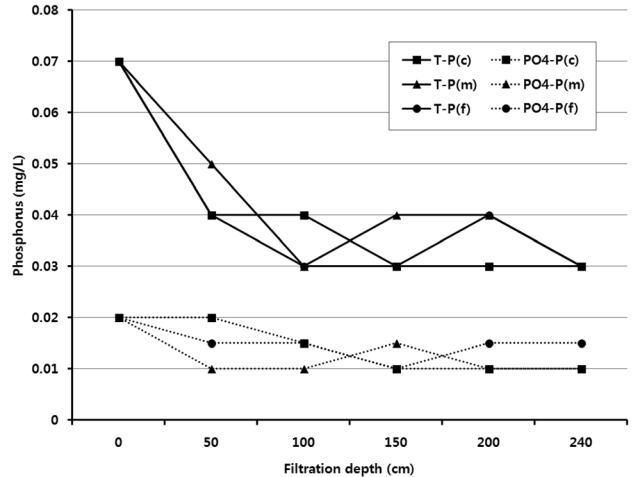


Fig. 10. Phosphorus concentrations along the filtration depth according to the grain size (cross-flow velocity 30 cm/sec, filtration rate 4 m³/m²-day)

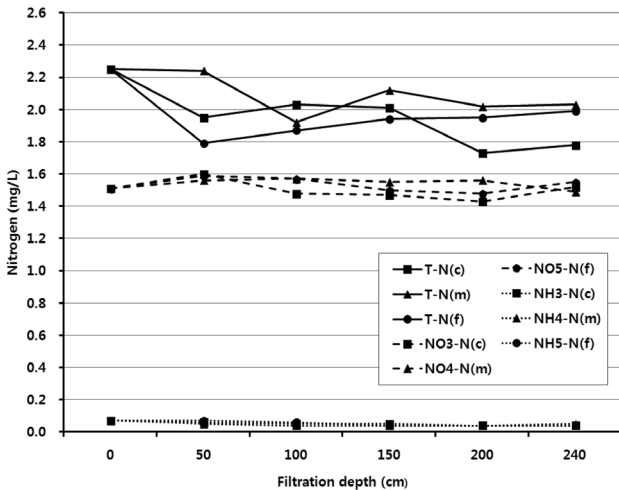


Fig. 9. Nitrogen concentrations along the filtration depth according to the grain size (cross-flow velocity 30 cm/sec, filtration rate 4 m³/m²-day)

m²-day에서 여재입경과 여과깊이에 따른 여과수의 BOD농도변화를 Fig. 8에 나타내었다. 이러한 BOD제거경향은 토양여과에서 일반적인 현상이며, 다른 연구에서도 이와 유사한 결과가 보고된 바 있다.^{17,18)}

여과깊이별 질소의 농도도 다른 수질항목과 마찬가지로 표류수 유속, 여재입경, 여과수량 등과 무관한 것으로 나타났으며, 본 연구의 여러 운전조건에서 총질소 제거율은 5~20%, 암모니아성 질소의 제거율은 25~40% 정도였다. 그러나 질산성질소는 여과과정에서 그 농도가 최대 약 10%까지 증가하였다. 총질소의 제거는 입자성 유기질소의 제거에 기인하는 것으로 판단되었으며 표층부근에서 활발하였고, 암모니아성 질소는 여과과정에서 일부가 토양표면에 흡착 및 산화되는 것으로 추정되었다.¹⁹⁾ 또한, 질산성질소의 농도증가는 유기질소가 일부 분해되고 암모니아성 질소가 산화되어 발생하는 것으로 판단되었다. 여과거리와 여재입경에 따른 질소농도 분포곡선의 예를 Fig. 9에 나타내었으며, 표류

수 유속 30 cm/sec, 여과수량 4 m³/m²-day에서의 관측치이다. 여과수에서의 이러한 질소농도분포는 유사한 다른 연구의 결과와도 부합한다.¹⁸⁾

여과수의 인 농도분포도 다른 수질항목과 마찬가지로 표류수 유속, 여과수량, 여재입경 등과 무관하였으며, 본 연구의 여러 운전조건에서 대략의 제거율은 T-P의 경우 20~60%로 상당히 큰 범위였고 PO₄-P는 25~50% 정도였다. 표층부근에서의 활발한 T-P제거는 입자성 인의 제거에 기인하는 것으로 판단되었으며, 이러한 결과는 유사한 연구의 보고와 부합한다.^{15,18)}

이상으로부터 본 연구에서와 같이 높은 여과수량을 적용하는 모래여과의 경우 주로 제거되는 물질은 입자성 물질이고, 표층 약 50 cm에서 주로 제거되므로 다량오염물의 제거가 목적이라면 다목적 여과저류지 또는 복류수 등의 집수매거 매설깊이 또는 여재두께를 크게 낮출 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결론

낙동강 중상류에서 얻은 서로 다른 3가지 입경의 준설토를 여재로 이용하여 표류수 유속을 0~40 cm/sec로 단계적으로 변화시키면서 여과수량과 여과수질을 관측한 파일럿규모의 실험결과, 표층 슬러지를 주기적으로 제거함으로써 높은 여과수량인 5~3 m³/m²-day를 얻을 수 있었고, 여과수량과 여재입경 그리고 표류수 유속 등의 차이에 의한 여과수의 수질차이는 없는 것으로 나타났다. 여과거리 2.4 m에서의 오염제거율은 탁도 80~95%, COD 20~30%, BOD 75~90%, T-N 5~20%, 그리고 T-P 20~60%로 주로 입자성 오염물의 제거율이 높은 것으로 나타났으며, 대부분의 오염제거는 표층 50 cm 부근에서 발생함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Sohn, D.-H., Park, J.-Y. and Kim, S.-H., "A Study on the Design of Artificial Stream for Riverbed Filtration in Multi-purpose Filtration Pond," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(7), 536~543(2011).
2. Hubbs, S., Ball, K., Haas, D. and Robison, M. J., "Chapter 4. Riverbank filtration construction options considered at Louisville, Kentucky," in "Riverbank Filtration-Improving source-water Quality," edited by Ray, C., Melin, G. and Linsky, R. B., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, (2002).
3. Unger, M., "The role of the schmutzdecke in E. coli removal in slow sand and riverbank filtration," Master's thesis, University of New Hampshire, U.S.A., (2006).
4. Ray, C., Melin G. and Linsky R.B. (editors), "Riverbank Filtration-Improving source-water quality, Part II : Contaminant Removal," Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (2002).
5. Ray, C. and Shamruk, M.(editors), "Riverbank filtration for water security in desert countries," Springer, Dordrecht, The Netherlands, (2011).
6. Sung, C.-D., Ahn, K.-H., Lee, Y.-H., Kong, I.-C. and Kim, S.-H., "A Study on the Water Quality Improvement through Riverbed Filtration-Model Development an Parameter Determination," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(4), 486~494(2003a).
7. Sung, C.-D., Ahn, K.-H., Lee, Y.-H., Kong, I.-C. and Kim, S.-H., "A Study on the Water Quality Improvement through Riverbed Filtration-Model Development and Parameter Determination," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(5), 580~587(2003b).
8. Hong, A.-K., Sohn, D.-B. and Kim, S.-H., "Removal of Organic Matter and Nitrogen in model System of Riverbed Filtration," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **27**(5), 525~534(2005).
9. Ahn, K.-H. Sohn, D.-B. and Kim, S.-H., "Reduction of Hydraulic Conductivity in a Model System of Riverbed Filtration," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **25**(4B), 301~308(2005).
10. Water and Power Resources Service, *Ground Water Manual*, 2nd Ed., U.S. Department of the Interior, U.S. Government Printing Office, Denver, (1981).
11. Kim, S.-H., Ahn, H.-H. and Ray, C. "Distribution of discharge intensity along collector well laterals in a model riverbed filtration," *J. Irrigat. Drainage Eng.*, **134**, 493~500(2008).
12. Kim, S. H., Ahn, K. H., Prasher, S. and Patel, R., "Extending riverbed filtration design velocity for horizontal well from model to prototypes," *Canadian Biosystems Engineering Journal*, in press, (2013).
13. APHA (American Public Health Association), "Standard methods for the examination of water and wastewater," 20th ed., Washington, D.C., USA, (1998).
14. Harbaugh, A. W. and McDonald, M. G., "User's documentation for MODFLOW-96. An update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model," Open File Report 96-485, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, U.S.A., (1996).
15. Baik, M. Y., "A study on purifying efficiency of water quality analysis for infiltrated water as filtered distance-focusing on Purification Plant at Goryeong, Gyeongbuk," Graduate School of Environmental Study, Yeungnam University, Korea, (2012).
16. Schubert, J., "German experience with riverbank filtration systems," in "Riverbank Filtration, Improving Source-Water Quality," edited by Ray, C., Melin, G. and Linsky R. B., Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (2002).
17. Pescod, M. B., "Wastewater treatment and use in agriculture-FAO irrigation and drainage paper 47, FAO, Rome, (1992).
18. Kim, H.-S. and Kim, S.-H., "A Study on Clogging and Water Quality Improvement in floodplain Filtration with Flood/rest Raw-Water Supply," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**, 120~131(2011).
19. Domenico, P. A. and Schwartz, F. W., "Physical and Chemical Hydrogeology," *John Wiley & Sons, Inc.*, New York, (1990).