大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 1305~1310. 2005.

하상여과의 집수관 모형에서 잔류수두와 유입율 분포에 관한 실험연구

안규홍 · 문형준* · 김경수* · 김승현†*

한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터 · *영남대학교 환경공학과

(2005년 9월 9일 접수, 2005년 12월 20일 채택)

An Experimental Study on the Distributions of Residual Head and Discharge Rate along Collector Well Laterals of a Model Riverbed Filtration

Kyu Hong Ahn · Hyung Joon Moon* · Kyung Soo Kim* · Seung Hyun Kim†*

Water Environment and Remediation Center, KIST(Korea Institute of Science and Technology)
**Department of Environmental Engineering, Yeungnam University*

ABSTRACT : As a way to the optimum design of the collector well lateral in riverbed filtration, experiments were performed using sand tanks which were connected to form a model lateral system. Measured were the residual hydraulic heads along the laterals, the discharge rates at each sand tank and the production rates at the collector well while the model laterals were operated with various scenarios of changing parameters including water level of the collector well, the lateral diameter and length, and the hydraulic conductivity of the sand. Results showed that riverbed filtration could be more efficient when the resistance in the lateral was weak compared with the resistance in the sand, which was indicated by the more flattened distribution of the residual hydraulic heads along the lateral. Results also showed that the discharge rate increased exponentially with the approach to the collector well, and that the exponent increased as the lateral diameter decreased and/or the hydraulic conductivity of the sand increased. It was also seen that the well production increased with the increase in the lateral length and diameter although the marginal productivity decreased. It could be concluded that the axial flow velocity in the lateral was an important factor governing the efficiency of a lateral in riverbed filtration and that the maximum entrance velocity to the collector well, over which the efficiency decreased drastically, was about 1 m/sec under the conditions of this study.

Key Words : *Riverbed Filtration, Lateral, Residual Hydraulic Head, Discharge Intensity, Sand Tank Experiment*

요약 : 하상여과에서 집수관의 최적 설계를 위한 방편으로 여러 개의 모래통을 이용하여 모형 집수관 실험을 수행하였다. 집수정의 수위, 집수관의 직경, 집수관의 길이, 그리고 모래의 투수계수를 변화시키면서 모형 집수관을 운영하였으며, 집수관 표면에서의 잔류수두와 집수관 각 부위에서의 여과수 유입율, 그리고 집수정에서의 산출유량을 측정하였다. 실험결과 모래층에서의 저항에 비해 집수관에서의 저항이 작아서 집수관 표면에서의 잔류수두가 수평에 가까운 경우 효율적인 집수관임을 알 수 있었다. 집수관의 여과수 유입율은 집수정에 근접할수록 지수함수적으로 증가하였고, 집수관의 직경이 작을수록 그리고, 대수층의 투수계수가 클수록 이 지수함수의 기울기는 증가하였다. 집수관의 길이와 직경이 증가하면 산출유량은 증가하지만 그 한계생산성은 감소하였다. 효율적인 하상여과를 위해서는 집수관에서의 축방향 유속을 줄이는 것이 중요함을 알 수 있었으며, 본 연구의 조건에서는 이 유속이 1 m/sec를 넘을 경우 우물의 효율이 크게 감소함을 알 수 있었다.

주제어 : 하상여과, 수평집수관, 잔류수두, 여과수 유입율, 모래통 실험

1. 서 론

유럽에서는 보다 양질의 상수원수를 얻기 위한 방편으로 강변여과가 150년 이상 사용되어 왔고, 최근 미국에서도 대규모로 강변여과가 개발되고 있다.[1,2] 우리나라에서도 오염된 하천수에서 깨끗한 상수를 생산하기 위한 방법으로 최근 강변여과를 시행하는 지방자치단체들이 늘어나고 있으며,[3,4] 오염된 하천수질을 개선하기 위한 방편으로 하상여과를 고려하기도 한다.[5] 강변여과나 하상여과에서는 수직정과 더불어 (수평)집수정이 많이 사용되고 있으며, 우리나라와 같이 좁은 지역에 많은 인구와 산업이 집중되어 있어, 유리하지 않은 대수층으로 부터 대량의 양수가 필요한 경우에는 집수정이 수직정에 비해 유리한 경우가 많다고 한다.[6]

집수정의 설계와 건설에서 집수관의 개수, 길이, 방향, 그리고 직경 등의 최적 값을 아는 것은 매우 중요하다. 집수정 설계에는 Hantush[7]의 공식이나 MODFLOW[8]와 같은 수치해법이 사용되기도 하고 혹은 경험에 의존하는 경우도 있다.[9] Hantush[7]는 집수관의 단위 길이당 여과수의 유입율이 집수관의 위치에 따라 다르지 않고 일정하다는 가정에 근거하여 집수정의 생산율을 예측하는 공식을 유도했다. 미국의 Louis-

† Corresponding author
E-mail: kimsh@yu.ac.kr
Tel: 053-810-2548 Fax: 053-812-2540

ville에서 적용되었듯이 수치해법을 이용한 설계에서는 집수관에서의 수두가 위치에 상관없이 일정하다는 가정이 사용되기도 한다.[10] 유럽의 일부 기술자들은 집수관의 전체 길이 중 집수정 부근에서 더 많은 여과수가 유입된다고도 한다.[11] 이러한 가정들은 경우에 따라 서로 상충되기도 하고 일정부분 유사하기도 하며, 집수정의 최적 설계를 위해서는 이에 대한 정확한 평가가 필요하다.

하상여과에서 집수정을 사용할 경우 대수층을 통과한 하천수는 집수관을 통해 수두가 낮은 집수정으로 흘러든다. 이때 물 흐름의 구동력은 하천수와 집수정의 수위차이며, 물의 흐름에 따라 수두손실이 발생하여 잔류수두는 점차 감소하고 마지막에는 집수정의 수위와 일치하게 된다. 이 과정에서 물이 통과하는 경로를 크게 둘로 나눌 수 있으며 하나는 대수층을 통한 흐름이고 나머지는 집수관을 통한 흐름이다. 이들 두 흐름의 해석에 동시에 필요한 자료는 집수관 표면에서의 잔류수두의 분포이다. 대수층에서의 흐름은 하천수위와 잔류수두 사이의 차이에 의해 발생하고, 집수관에서의 축방향 흐름은 잔류수두의 분포에 의해 영향 받기 때문이다.

본 연구에서는 여러 가지 길이와 직경의 집수관과 두 가지의 투수계수를 가지는 모형 하상여과 모래통을 운영하여 집수관 표면에서의 잔류수두와 집수관 각 부위에서의 여과수 유입율을 측정하고 그 결과를 해석하여 최적의 집수관 설계를 위한 기초자료로 제공한다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서는 폭 20 cm, 길이 60 cm, 그리고 높이 50 cm인 모래통 3개와, 폭과 높이는 같고 길이가 80 cm인 1개의 모래통을 실험장치로 사용하였다. 이들 모래통은 모두 아크릴로 제작되었다. 모래통에는 집수관을 설치하였으며, 실험에 사용된 집수관의 내경은 3종류로 3.0 cm, 2.0 cm, 그리고 1.0 cm이었고, 두께는 모두 0.7 mm이었다. 집수관은 바닥에서 10 cm 높이에 길이방향으로, 그리고 모래통 폭의 가운데에 수평으로 설치하였다. 집수관 스크린의 개공율은 최소 22%로 유입손실수두는 크지 않을 것으로 기대되었다.[12] 집수관의 외부 표면에는 외경 3.0 mm, 두께 0.5 mm인 비닐튜브로 만든 피조미터를 20 cm 간격으로 설치하여 압력수두를 측정할 수 있도록 하였다. 모래통은 46 cm 깊이로 모래를 채웠다. 모래통에 연결하여 집수정을 운영하였으며, 집수정은 밑면적이 10 cm×20 cm인 아크릴통을 수직으로 세운 것으로, 바닥으로부터 15 cm, 25 cm, 그리고 35 cm의 높이에 직경 5 cm의 구멍들을 뚫어 여과수의 출구로 사용할 수 있도록 하였다. 모래통 사이에는 약 7 cm 길이의 스텐레스 무공관을 연결하여, 여러 조의 모래통을 연결하였어도 이들이 하나의 모래통처럼 기능하도록 하였다. 모래통 운영시에는 모래표면을 통해 모래통에 수돗물을 공급하였으며, 모래표면 위의 수심을 항상 3 cm로 유지하였다. 실험에 사용된 모래는 두 종류였으며, 그 투수계수는 각각 0.155 cm/sec와 0.044 cm/sec이었다. 모래의 투수계수는 내경 15.0 cm, 높이 40.0 cm인 원통에 모래를 28.0 cm깊이까지 채우고 일정한 수두차 6.1 cm를 적용하여 하향식 흐름으로 얻은 유량에 Darcy의 공식을 적용하여 얻었다. 모형 집수관의 실험장치의 개요는 Fig. 1에 나타내었다.

실험은 모두 4단계로 나누어 수행하였다. 첫 단계에서는 모든 모래통에 내경 2.0 cm인 집수관을 설치하여 전체 유효길이를 260 cm로 운영하였다. 집수정에서 가장 먼 곳에는 80 cm길이의 모래통을 위치시켰다. 사용된 모래의 투수계수는 0.155 cm/sec이었다. 모래통에 물을 공급하여 모래통의 수위를 일정하게 유지하고, 집수정의 수위를 변화시키면서 집수정에서의 산출유량, 집수관 표면에서의 수두분포, 그리고 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다.

두번째 단계에서는 첫번째 단계의 실험에서 집수관의 길이를 변화시키기 위하여 집수정에서 먼 쪽부터 모래통을 하나씩 제거하면서 집수정에서의 수위변동에 따라 산출유량, 집수관 표면에서의 수두분포, 그리고 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다. 세번째 단계에서는 60 cm 길이 모래통 3조를 연결하여 집수관의 유효길이를 180 cm로 운영하였으며, 여기에 집수관의 직경을 3.0 cm, 2.0 cm, 그리고 1.0 cm로 변화시키면서 집수정에서의 수위변동에 따라 산출유량, 집수관에서의 수두분포, 그리고 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다. 사용된 모래는 앞의 실험과 같았다.

네번째 단계에서도 60 cm 길이의 모래통 3조를 연결하여 사용하였다. 집수관의 직경은 2.0 cm이었고, 투수계수가 0.044

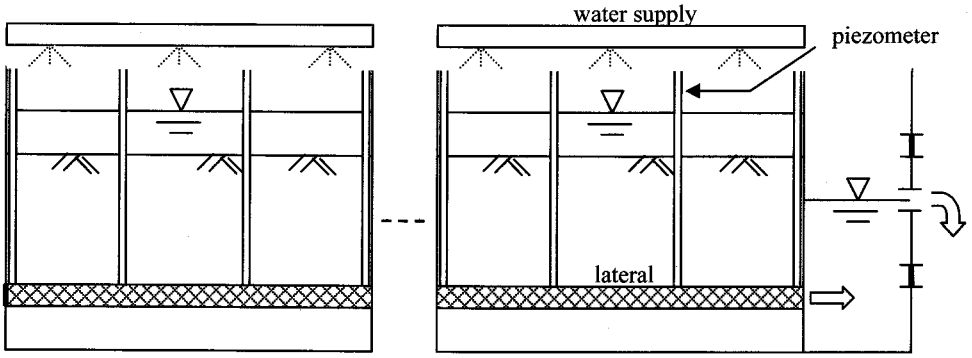

Fig. 1. Schematization of the model lateral.

cm/sec인 모래를 사용하여 모래통을 운영하였으며, 집수정에서의 수위변동에 따라 산출유량, 집수관에서의 수두분포와 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다. 유량 측정시 50 L 들이 용기와 정밀시계를 이용하였고, 집수정의 수위와 집수관의 수두는 모래통의 바닥을 기준면으로 하여 측정하였으며, 모든 실험은 20±1℃로 조절된 실내에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구의 모든 실험에서 집수정의 산출유량은 각 모래통에서의 유입유량 측정치의 합과 1% 이내의 측정오차로 일치하였다. 첫번째 실험에서 얻은 집수정의 수위별 수두분포를 Fig. 2에 나타내었다. 집수정에서의 수위는 17.0 cm, 26.7 cm, 그리고 35.8 cm이었으며, 산출유량은 각각 0.000399 m^3/sec, 0.000320 m^3/sec, 그리고 0.000232 m^3/sec이었다. 이들 산출유량을 이용하여 집수관에서 집수정으로 유입하는 유속을 계산하면 각각 1.27 m/sec, 1.02 m/sec, 그리고 0.74 m/sec이었다. 집수정의 수위가 낮을수록 산출유량이 증가하지만 수위저하가 커질수록 산출유량의 증가는 둔화되는 것을 알 수 있다. 이는 집수관에서의 잔류수두가 집수정의 수위감소에 따라서 전체적으로 균일하게 감소하지 않고, 집수정의 수위감소는 집수정 부근에서의 잔류수두에는 크게 영향을 주지만 집수정에서 멀어질수록 그 영향이 줄어들기 때문으로 판단된다. 집수정의 수위감소가 집수관 전체에 균일하게 전달되지 못하는 이유는 집수관 내부의 마찰저항에 기인하며 이 저항이 클수록 잔류수두곡선이 급하게 변화하고 이에 따라 우물의 효율은 감소한다. 마찰저항은 속도수두의 제곱에 비례하므로[13] 마찰저항을 줄이기 위해서는 집수관에서의 유속을 감소시켜야 할 것으로 판단된다. 또한, 집수관에서 집수정으로 유입될 때에도 수두손실이 발생하여 우물의 효율을 감소시킨다. 이 수두손실은 산출유량이 클수록 커서 각각 7.0 cm, 3.9 cm, 그리고 2.0 cm이었으며, 집수정에 인접한 집수관에서의 잔류수두와 집수정 수위의 차이로 측정하였다.

4조의 모래통에서 유입유량의 실측치를 Fig. 3에 나타내었다. 집수정에서 가장 먼 모래통의 길이가 다른 3개 보다 긴 80 cm임을 고려하면, 집수관의 여과수 유입율은 집수정에서 멀어질수록 감소하며 그 형태는 Hantush[7]의 가정과 달리 지

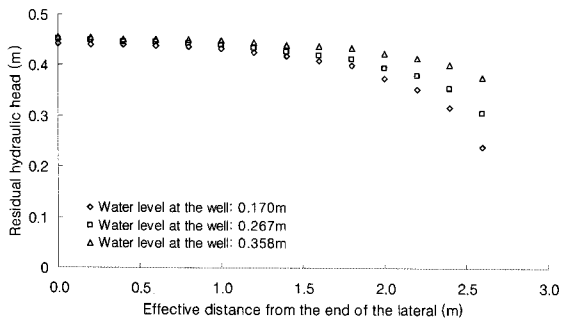

Fig. 2. Residual hydraulic head distributions according to the water level at the well(lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec).

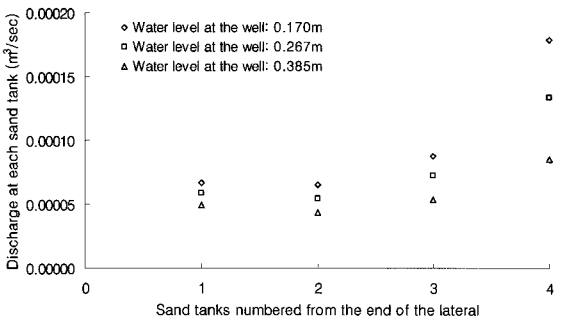

Fig. 3. Discharge rates at each sand tank along the lateral (tank length: 80 cm, 60 cm, 60 cm, and 60 cm from the end of the lateral, lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec).

수함수적임을 알 수 있었다. 또한, 집수정의 수위가 높아서 산출유량이 적을수록 지수함수의 기울기가 완만해서 여과수가 집수관 전체에서 비교적 골고루 유입됨을 알 수 있었다. 이 현상은 본 연구에서 수행했던 모든 실험에서 공통적으로 발견되었다.

두번째 실험의 결과 중에서 집수정의 수위가 약 16 cm인 경우의 잔류수두분포를 Fig. 4에 나타내었고, 집수관의 각 구간, 즉 각 모래통에서의 유입율을 Table 1에 나타내었다. 집수정 출구의 크기와 위치가 고정되어 있었음에도 불구하고 집수관이 길수록 산출유량이 많아 집수정에서의 수위가 조금씩 높아졌으며 집수관 길이에 따라 15.1~17.0 cm이었다. 집수관이 길수록 집수정에 접근하면서 그 수두가 더 급격히 감소함을 알 수 있고, 본 연구에는 나타내지 않았지만 집수정의 수위가 다른 경우에도 같은 경향을 나타내었다. 또한, Table 1에서 집수관이 길수록 집수정의 산출유량은 증가하지만 집수관 단위 길이당 산출유량은 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상들은 집수관이 길수록 유량이 증가하여 집수정에 가까운 집수관에서의 유속이 증가하고 이에 따라 마찰저항도 커져서 집수정 부근에서 집수정과의 거리가 멀어짐에 따라 잔류수두가 급격히 상승하고, 따라서 집수관 전체길이에 대해서는 하천바닥과 집수관 사이의 동수경사가 감소하여 집수관 단위길이당 모래를 통한 여과율, 즉 우물의 효율은 감소하기 때문이다.

Table 1에서 집수관의 길이가 짧아지면 집수관 단위 길이당 유입율뿐 아니라 집수정 부근의 집수관에서의 유입율이 증가함을 알 수 있다. 이는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 집수관의 길이가 짧으면 집수정 부근에서 수두곡선의 기울기가 완만해지고 전체적으로 잔류수두가 작아지기 때문이다. 이는 세번째 실험결과의 해석에서 언급되듯이 모래층에서의 저항에 비해 집수관에서의 저항이 큰 경우에 특징적으로 나타나는 현상이다. 유럽의 경우 일반적으로 대수층의 투수계수가 커서[9] 집수관의 직경이 이에 상응하지 못할 경우에는 이러한 특징들이 두드러지게 나타날 것으로 판단된다. 집수관이 짧은 경우 집수관 단위 길이당 산출율은 증가하여 우물의 효율은 증가하지만 하천수의 대수층 체류시간이 감소하여 수질개선 효과는 감소할 것으로 예상되고, 특히 방사형 집수정을 이

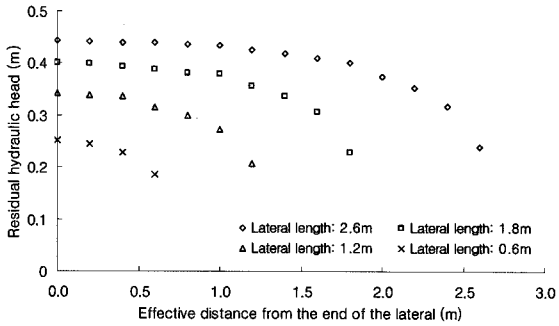

Fig. 4. Residual hydraulic head distributions according to the lateral length(lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec).

Table 1. Discharge rate at each section of the lateral (water level at the well≅16 cm)

Lateral length(cm)	Production rate(m^3/sec)	Discharge rate at each section(m^3/sec)			
		0~60cm	60~120 cm	120~180 cm	180~260 cm
260	0.000399	0.000179	0.000088	0.000065	0.000067
180	0.000384	0.000186	0.000107	0.000091	
120	0.000351	0.000203	0.000148		
60	0.000267	0.000267			

용할 경우 집수정 부근에 여러 가닥의 집수관이 집중하게 되어 수질개선효과는 감소할 것이므로 주의가 필요할 것으로 판단된다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 집수정의 수위를 약 26 cm와 36 cm로 높인 실험결과들과 Fig. 4를 비교하면, 집수정의 수위를 낮춰서 산출유량이 증가할수록 집수관의 길이 증가에 따른 한계 산출율이 더 작아지는 것을 알 수 있었다.

세번째 실험결과인 집수관 직경별 잔류수두분포곡선을 Fig. 5에 나타내었다. 집수관의 직경이 1.0 cm, 2.0 cm, 그리고 3.0 cm일 경우 집수정에서의 수위는 각각 15.0 cm, 16.3 cm, 그리고 17.5 cm이었고, 집수정에서의 산출유량은 각각 0.000129 m^3/sec, 0.000384 m^3/sec, 그리고 0.000552 m^3/sec로 집수관의 직경이 커질수록 산출유량이 증가하였으나 직경증가에 따른 산출유량 증가율은 둔화되었다. 이들 산출유량으로부터 집수정 유입유속을 구하면 각각 1.60 m/sec, 1.22 m/sec, 그리고 0.76 m/sec이었다. 집수관의 직경이 증가함에 따라 집수관에서의 잔류수두는 감소하고 수두분포는 수평에 근접함을 알 수 있다. 이는 집수관의 직경이 커짐에 따라 집수관에서의 저항이 감소하여 집수정에서의 수위저하의 영향이 더 멀리 그리고 더 강하게 미치기 때문이다. 또한, 집수관의 직경이 증가하여 산출유량이 증가하면 모래에서의 통과유속이 빨라지고 이에 따른 수두손실도 증가하므로 집수관 표면에서의 잔류수두는 감소하게 된다. 이때 잔류수두분포가 수평에 근접하여도 집수관의 직경이 커지므로 그 통수능은 충분하게 된다. 이와 같이 집수관의 산출유량에 따라 모래층에서의 저항과 집수관에서의 저항 사이의 균형에 의해 집수관에서의 잔류수두와 수두경사가 결정됨을 알 수 있다. Fig. 5에서 집수관 직경이 1.0 cm인 경우 집수정 부근에서 수두값이

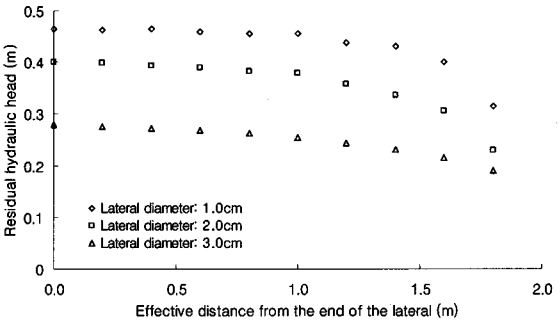

Fig. 5. Residual hydraulic head distributions according to the lateral diameter(hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec).

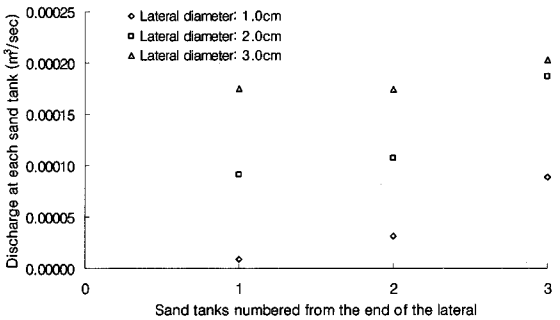

Fig. 6. Discharge rates at each sand tank according to the lateral diameter(hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec).

급격히 감소하였고, 집수정 유입시 유속은 1.60 m/sec, 수두손실은 16.5 cm에 달하였다. 이는 본 연구에서 수행한 모든 실험 중 모래층에서의 저항에 비해 집수관에서의 저항이 가장 큰 경우였으며, 따라서 집수관 내부의 유속이 최대였고 수두손실도 가장 컸다.

앞의 세 단계의 실험결과들로부터 하상여과에서 집수관의 직경이 충분하지 않을 경우 대수층에서의 유속과 수두손실은 감소하고 집수관 내부에서의 유속과 수두손실은 증가하여 집수정의 효율이 감소함을 알 수 있다. 본 연구에서 수행한 여러 실험들로부터 이 과정에서 가장 중요한 인자는 집수정에의 유입유속임을 알 수 있었으며, 이 값이 약 1 m/sec 이상일 경우에는 집수정 부근에서 잔류수두 분포곡선이 급격히 변하여 우물의 효율이 크게 감소하는 것을 알 수 있었다. 이와 반대로 대수층의 투수계수에 비해 집수관의 직경이 충분히 큰 경우에는 집수관에서의 잔류수두분포가 수평에 가까움을 알 수 있었다. Fig. 5에 대응되는 각 모래통에서의 여과수 유입율을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 3에서와 같이 집수정에 접근할수록 여과수 유입율은 지수함수적으로 증가하였으나, 집수관 직경이 클수록 그 증가율이 완만하여 여과수가 비교적 골고루 유입되고 Hantush[7]의 가정에 근접함을 알 수 있었다.

마지막 단계로 투수계수가 작은 모래를 이용한 실험에서 얻은 잔류수두분포를 Fig. 4의 180 cm 길이의 집수관에 대한 값과 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 집수정의 수위는 약 15 cm이었고 산출유량은 0.000114 m^3/sec이었으며, 이로부터 계산된 집수정 유입유속은 0.35 m/sec이었다. 집수관의 직경이 같은 경우 모래의 투수계수가 작으면 집수관에서의 수두값

은 작고 수두분포는 더 평평해짐을 알 수 있다. 이는 Fig. 5에서 설명되었듯이 모래의 투수계수가 감소하면 모래에서의 저항은 증가하고 산출유량의 감소로 인해 집수관에서의 저항은 감소하기 때문이다. 본 논문에는 나타내지 않았지만 투수계수가 작은 모래통에서 집수정의 수위를 변화시켜 집수관에서의 잔류수두분포를 얻었으며, 그 수위가 높아서 산출유량이 작을수록 잔류수두값은 증가하고 그 수두분포는 수평에 더 가까워져서 앞의 결과들과 부합하는 것을 알 수 있었다. 한편, 집수정의 수위가 34 cm인 경우 잔류수두의 기울기는 1/600에 불과하여 거의 수평이었지만 집수정에의 유입유속은 0.17 m/sec에 달하였다. 이로부터 집수관에서의 흐름현상을 이해할 수 있다.

하상여과에서 하천수에서 집수정으로 물의 흐름이 발생하며, 집수관 표면의 잔류수두는 집수관 내부에서는 속도수두와 압력수두로 나뉘고, 집수정에 가까울수록 집수관 내부의 유량이 증가하므로 축방향 유속이 증가한다. 집수관 표면의 잔류수두의 분포는 거의 수평이더라도 집수관 내부의 흐름에서는 집수정에 가까울수록 속도수두가 증가하므로 압력수두는 점차 감소하여 축방향 흐름유속은 증가하게 된다. 또한, 집수정에 가까울수록 압력이 낮아지므로 집수관 주변의 여과수가 압력차에 의해 유입되고 이로 인해 다시 축방향 유속이 증가하는 기작이 형성되는 것이다. Fig. 7에 대응하는 각 모래통에서의 여과수 유입율을 Fig. 8에 나타내었다. 집수관의 직경이 일정하더라도 모래의 투수계수가 작으면 여과수는 집수관 전체에서 거의 골고루 유입되어 우물의 효율이 증가함을 알 수 있다.

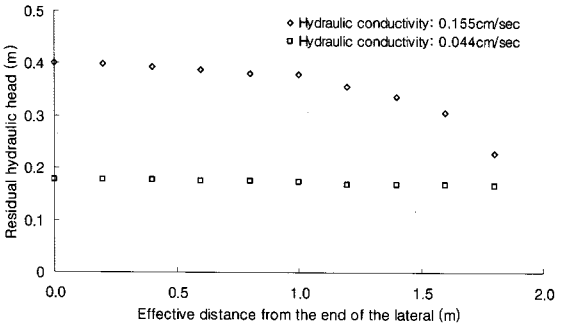

Fig. 7. Residual hydraulic head distributions according to the hydraulic conductivity of the filter sand(lateral diameter: 2.0 cm).

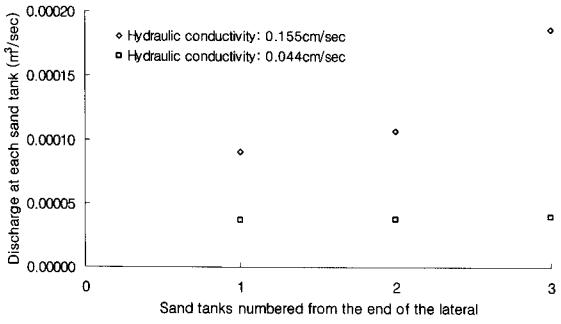

Fig. 8. Distributions of discharge rates according to the hydraulic conductivity of the filter sand(lateral diameter: 2.0 cm).

4. 결 론

효율적인 하상여과는 집수관 표면에서의 잔류수두분포가 수평에 가까워야 하고, 이는 대수층에서의 저항에 비해 집수관에서의 저항이 작은 경우임을 알 수 있었다. 집수관의 여과수 유입율은 집수정에 근접할수록 지수함수적으로 증가하였고, 집수관의 직경이 작을수록 그리고, 대수층의 투수계수가 클수록 이 함수의 기울기는 증가하였다. 집수관의 길이와 직경이 증가하면 산출유량은 증가하지만 그 한계 생산성은 감소하였다. 효율적인 하상여과를 위해서는 집수관에서의 축방향 유속을 줄이는 것이 중요함을 알 수 있었으며, 본 연구의 조건에서는 이 유속이 1 m/sec를 넘을 경우 우물의 효율이 크게 감소함을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원의 금수강산21 연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Schubert, J., "German experience with riverbank filtration systems," *Riverbank Filtration, Improving Source Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B.(Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 35～48(2002).
2. Wang, J., "Riverbank filtration case study at Louisville, Kentucky," *Riverbank Filtration, Improving Source Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B.(Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 117～146(2002).
3. 가평군, 가평군 강변여과수 타당성조사 및 통합상수도 시설설계 보고서(1998).
4. 창원시, 방사형 집수정에 의한 강변여과수 개발타당성 조사 및 pilot plant 조사연구 보고서(2003).
5. 김승현, 정장식, "하상여과를 이용한 금호강 수질개선연구," 환경연구 영남대학교 환경문제연구소 논문집, **18**(2), 73～86(1999).
6. Hunt, H., "Conceptual design of riverbank filtration systems," *Riverbank Filtration, Improving Source Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B.(Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 19～28(2002).
7. Hantush, M. S., Hydraulics of Wells, Advances in Hydroscience, vol. 4, Academic Press, Inc., New York, pp. 281～431(1964).
8. 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).

9. Grischek, T., Schoenheinz, D., and Ray, C., "Siting and design issues for riverbank filtration schemes," *Riverbank Filtration, Improving Source Water Quality*, Ray, C., Melin, G., and Linsky R.B.(Eds.), Water Science and Technology Library, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 291~302(2002).
10. Schafer, D. C., "Hydraulic analysis and modeling of riverbank filtration for Louisville water company," International Workshop on Riverbank/bed Filtration, Korea Institute of Science and Technology(Green Korea 21), COEX(2004).
11. Gyula, C., Vice President, Schki bau KFT, Budapest, Hungary, personal correspondence(2004).
12. Water and Power Resources Service, Ground Water Manual, 2nd ed., U.S. Department of the Interior, U.S. Government Printing Office, Denver(1981).
13. Hwang, H. C. and Houghtalen, R. J., Fundamentals of Hydraulic Engineering Systems, 3rd ed., Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey(1996).