

강변여과에서 파일럿규모 수평집수관의 수두분포 연구

A Study on the Distribution of Hydraulic Head Along the Lateral in a Pilot-Scale Riverbank Filtration

정재민 · 박재영* · 이종진* · 김용운* · 김승현

Jae-Min Jeong · Jae-Young Park* · Jong-Jin Lee* · Yong-Woon Kim* · Seung-Hyun Kim

영남대학교 환경공학과 · *한국수자원공사 사업기획실

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

*Business Research & Planning Dept., K-water

(2013년 1월 22일 접수, 2013년 5월 1일 채택)

Abstract : A pilot-scale sand-box experiment simulating a lateral of collector well used in riverbank filtration was performed, and hydraulic head distributions along the lateral were measured according to the various drawdowns at the well. The results of this experiment were compared to the predicted values obtained using a theory previously developed by Kim²⁵⁾ in order for its validation. This theory predicts the head loss in a large-scale lateral given the loss in a small-scale one, and to have actual values for comparison, the results from a lab-scale experiment previously performed by Kim²⁴⁾ were employed. Comparing the experimental values to the extrapolated value indeed confirmed the validity of the theory. A procedure to determine the hydraulic head distribution of a practical-scale lateral was also presented applying the theory to the experimental result of this study in an effort to show the process of lateral design for riverbank filtration.

Key Words : Riverbank Filtration, Pilot-Scale, Sand-Box Experiment, Lateral, Hydraulic Head Distribution

요약 : 강변여과용 수평집수관을 모사하는 파일럿 규모의 모래통 실험을 수행하였으며, 다양한 출구유속에 대한 수평집수관에서의 수두분포를 구하였다. Kim²⁴⁾이 수행한 실험실 규모의 수평집수관에서의 손실수두에 Kim²⁵⁾이 개발한 이론 즉, 작은 규모의 수평집수관에서의 손실수두로부터 큰 집수관의 손실수두를 계산하는 방법을 적용하여 본 연구의 관측치와 비교함으로써 Kim²⁵⁾의 이론이 타당함을 알 수 있었다. 또한, 이들의 이론을 적용하여 본 연구에서의 관측치로부터 실규모 집수관에서의 수두분포를 구하는 방안을 예를 들어 설명함으로써 강변여과의 수평집수관 설계방법을 제시하였다.

주제어 : 강변여과, 파일럿규모, 모래통실험, 수평집수관, 수두분포

1. 서론

강변여과는 유럽에서 150년 이상 상수원수 생산방식으로 널리 이용되어 왔으며, 미국에서도 안전한 상수원수 확보방식으로 점차 강변여과를 많이 이용하고 있다.¹⁾ 우리나라에서도 1990년대 낙동강의 폐놀오염사고 이후 이 방식이 도입되었고, 한국수자원공사와 여러 지자체에서 상수원수 확보 또는 하천수질개선을 위하여 점차 널리 활용되고 있다. 보다 좋은 하천환경과 질 좋은 수돗물에 대한 요구는 계속될 것이므로 앞으로도 우리나라뿐 아니라 세계적으로 강변여과에 대한 수요가 지속될 것으로 예상된다. 한편, 강변여과에 사용되는 우물형태는 몇 가지가 있으며 물 웅덩이(pit well), 수직정, 집수정(collector well), 집수매거(infiltration gallery) 등으로 기술의 발달과 현장특성, 그리고 물 수요에 따라서 그 형태가 적응 또는 진화해 왔으며, 효율이 좋고 관리가 용이한 대용량의 집수정이 점차 널리 사용되고 있는 추세라 할 수 있다.^{2,3)} 강변여과의 설계에서 산출유량을 정확히 계산하는 것은 매우 중요하며, 물 웅덩이나 수직정, 집수매거 등에 대해서는 지하수리학적 이론에 근거하여 산출유량산

정을 위한 해석해들이 개발되어 있다.⁴⁻⁶⁾ 집수정의 산출유량 예측방법은 1940년대 후반부터 다양하게 시도되었으며, 초기에는 기존의 다른 우물의 산출유량자료를 참고하여 산출유량을 예측하였고, 점차 경험공식 그리고 수리학적 이론에 바탕을 둔 공식이 개발되었으며, 전기수리학적 유사모델실험(electrohydrodynamic analogue experiment)을 이용한 예측식도 개발되었다. Milojevic⁷⁾은 앞에 열거된 여러 모델들의 개발자들을 소개하였고, 이외에도 Haefeli와 Zeller가 소규모 설비를 이용하여 수행한 실험결과를 해석한 Petrovic식 그리고 Kordas가 전기수리학적 유사모델실험을 수행하여 얻은 식 등을 소개하였으며, 그 자신이 전기수리학적 유사모델실험을 통한 경험공식을 개발하였다. 한편, Hantush와 Papadopoulos⁸⁾가 수리학적 이론에 근거하여 하천의 수변으로부터 다양한 거리에 있는 집수정의 산출유량을 결정하는 식을 발표한 이래 최근까지 다양한 경계조건에 대해서 수리학적 이론에 근거한 해석해가 다수 개발된 바 있다.⁹⁻¹²⁾ 이들 공식들은 수평집수관을 선형 싱크(sink)로 보고 우물전체에 걸쳐 일정수두 또는 일정유입률 경계조건을 적용하였으며, 수평집수관 내부에서의 흐름은 고려하지 않았다. 이에

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

더하여 이들 식들은 대수층이 수리학적으로 균질하고, 하상에 표면폐색이 없으며, 하천의 바닥이 매우 깊다는 등 개발자에 따라 그 유도과정에서 여러 가지 가정을 도입하여 공식의 적용에 제한요소가 되므로 이들 식의 사용시 주의가 필요하다.

집수정의 산출유량에 대한 해석해의 단점을 보완하는 방안으로 수치해를 사용할 수 있다. 수치해는 다양한 대수층과 양수조건을 포함한 경계조건을 모사할 수 있어서 점차 널리 사용되고 있으며, 많이 사용되는 수치해법으로는 유한요소법, 유한차분법, 유한체적법 등이 있다.¹³⁾ 수치해법을 이용하여 대수층에 설치된 수평집수관을 해석할 때, 대수층은 Darcy의 공식이 적용되는 다공매질인데 비해 수평집수관은 일종의 관수로이므로 서로 다른 이들 두 흐름영역을 하나의 체계에서 해석해야 하는 문제가 발생한다. 다공매질의 수치해법에서 수평집수관을 처리하는 데는 몇 가지 방안들이 적용되고 있다. 첫째로는 수평집수관이 지나가는 블록의 투수계수를 대수층 투수계수의 1,000~10,000배 정도의 큰 값으로 할당하는 것이다.¹⁴⁾ 이 방식은 적용이 쉽지만 이론적인 근거가 없고, 대입하는 투수계수의 크기도 자의적이어서 그 신뢰도가 떨어진다고 할 것이다. 또한, 집수관이 긴 경우 집수관 내부에서의 축방향 흐름에 대한 저항을 고려할 수 없는 단점도 있다. 두번째는 앞의 방법과 유사한 개념을 적용하며 Chen 등이 개발하였다.¹⁵⁾ 이들은 수평집수관 내부의 흐름을 층류, 천이류, 난류의 3영역으로 나누고 출구에 다가갈수록 축방향 유량과 레이놀즈수가 증가하는 특성을 고려하여 점차로 큰 투수계수 값을 할당하였다. Wang과 Zhan은 이 기법을 이용하여 중국의 황하강 지류인 Wuding강에서 일련의 강변여과정군에 대한 설계와 그 효능향상을 위한 시나리오분석을 수행한 바 있다.¹⁶⁾ 이 기법은 첫번째 방법에 비해 개량된 것이지만 수평집수관을 대수층의 일부로 ‘속여서’ 모델에 입력하므로 실용성은 있지만 이론적으로는 여전히 문제를 안고 있다고 보아야 할 것이다. 따라서 실용적일 뿐 아니라 이론적으로도 흠이 없는 새로운 기법의 개발이 필요하다고 할 것이다.

Hantush와 Papadopoulos⁸⁾ 이후 수리학적 이론에 근거한 해석해들은 수평집수관의 수두가 집수관 전체 길이에 걸쳐서 일정하다거나 또는 집수관 단위 길이당 여과수 유입률이 일정하다는 가정에 기초하고 있다. 이러한 가정은 집수관이 짧은 경우에는 문제가 없지만 긴 경우에는 집수관 내부에서의 축방향 흐름에 대한 저항이 커져서 이를 무시하는 경우 오차가 커지게 된다. 수평집수관에서의 축방향 흐름에 대한 저항으로 발생하는 수두분포의 전형적인 왜곡양상을 Fig. 1에 나타내었다.

이와 같이 수평집수관 내부에서의 축방향 흐름에 대한 저항을 무시하여 발생하는 오류는 Tarshish, Chen 등, 그리고 Mohamed와 Rushton 등에 의하여 이미 지적된 바 있다.^{15,17,18)}

한편, 이 오류는 대수층의 두께가 얇은 경우 그 효과가 더 크게 나타나는데, 얇은 대수층에서는 집수정에서의 수위저하를 크게 할 수 없어서 마찰에 의한 손실수두(Fig. 1에서 수

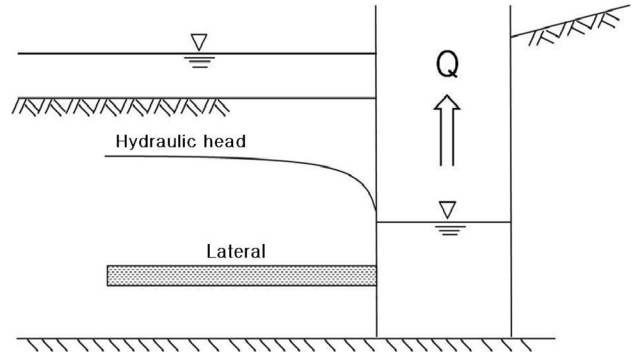


Fig. 1. Typical hydraulic head distribution along the lateral of riverbank filtration owing to the resistance to the axial flow in the lateral.

평집수관 양 끝 사이의 수두차)가 집수정에서의 수위저하에 비해 상대적으로 크기 때문이다.

대수층의 두께가 수백 m에 달하는 나일강변에서는 수직정이라도 우물에서의 수위저하를 크게 하면 많은 양의 여과수를 생산할 수 있다.¹⁹⁾ 독일의 경우 대수층은 두껍지 않지만 투수계수가 매우 커서 큰 산출유량을 얻을 수 있다. 이들 조건에서 주로 사용되는 우물형태는 수직정이며, 길이가 짧은 수평집수관을 다수 장착한 집수정이 사용되기도 한다.²⁰⁾ 이들과 달리 우리나라에서는 대수층이 수 m~30 m 정도로 두껍지 않고 투수계수도 작아서 강변여과에 유리하지 않은 특징을 가지며, 이러한 대수층에서 큰 산출유량을 얻기 위해서는 수평집수관을 하천의 평수로 하부 일정깊이에 가급적 길게 설치하여야 한다.²¹⁾ 또한, 현재 지방상수도에서 많이 사용되고 있는 복류수²²⁾와 4대강사업 이후 고려되고 있는 다목적 여과저류지²³⁾ 등의 간접취수방식에서는 3~4 m 정도의 매우 얇은 대수층에 수십~수백 m에 달하는 긴 수평집수관을 이용하고 있거나 계획하고 있다. 우리나라의 간접취수에 특징적인 이러한 얇은 대수층에 긴 수평집수관을 설치하는 경우 집수관 내부에서의 흐름에 대한 마찰저항이 상대적으로 큰 비중을 차지하여 수평집수관 해석시 이를 일정한 수두로 간주하는 것은 산출유량결정에 큰 오차를 발생시키므로 이를 방지할 수 있는 방안이 필요하다.

우리나라의 간접취수에서와 같이 얇은 대수층에 설치된 긴 수평집수관의 산출유량을 결정할 때 직면하는 이러한 문제를 해결하기 위해, 마찰에 의한 수두손실을 고려하여 수평집수관에서의 수두분포를 구하는 연구가 수행된 바 있다. Kim²⁴⁾은 여러 개의 모래통을 관통하는 수평집수관을 이용한 실험실 규모의 강변여과 모형실험을 수행하여 집수관에서의 수두분포를 구하였고, 베르누이 정리를 응용한 수학적 모델링을 통해 실험결과를 해석하였다. Kim²⁵⁾은 Euler의 기법을 적용하여 Kim²⁴⁾이 얻은 실험실 규모의 수두분포를 보다 큰 규모의 수평집수관으로 확장하는 기법을 개발하였으며, 이는 작은 규모의 실험에서 얻은 집수관 수두분포자료를 이용하여 큰 집수관의 수두분포를 파악할 수 있도록 하기 위함이었다. 그러나 Kim²⁵⁾이 개발한 방법은 보다 큰 규모의 수평집수관에서의 실험을 통해 검증되지 않았으며, 따

라서 실험실보다 큰 규모의 실험에서 이를 검증할 필요가 있다. 또한, 이들의 방법론을 적용하더라도 실험실 규모의 실험결과를 바로 실규모의 집수관으로 확장하는 것보다는 파일럿 규모의 실험자료를 확보하여 이를 실규모로 확대하는 것이 실규모의 수두분포를 보다 정확히 구하는데 더 유리하다고 할 것이다.

본 연구에서는 강변여과를 모사하는 파일럿 규모의 모래통 실험에서 다양한 출구유속에 대한 수평집수관에서의 수두분포를 관측하여, 작은 규모의 수평집수관 수두분포로부터 큰 규모의 집수관에서의 수두분포 즉, 마찰저항을 구하는 Kim²⁵⁾의 방법론을 검증하고 또한, 실규모의 수평집수관 설계에 대한 기초자료로 활용되도록 한다.

2. 실험장치 및 방법

실험장치로 사용된 모래통은 길이 5.5 m, 폭 1.5 m, 높이 3.0 m였고, 철판으로 제작된 윗면이 없는 직육면체 구조물이었다. 이 모래통을 수평으로 설치한 후 낙동강의 칠곡군 석적읍에서 얻은 4대강사업 준설모래를 2.5 m 높이까지 채웠다. 모래의 표면은 경사가 없었으며, 모래의 투수계수는 37 m/day이었다. 사용된 모래의 입도분포는 Fig. 2에 나타내었다. 모래통에 모래를 채우기 전에 수평집수관을 설치하였으며, 이 집수관의 설치위치는 모래통의 바닥면에서 10 cm, 그리고 한쪽 벽면에서 10 cm만큼 떨어진 곳이 집수관의 중심이 되도록 하였고,⁶⁾ 모래통의 길이방향으로 전체 길이에 걸쳐 설치하였으나 집수관의 최상류 80 cm 구간을 제외한 나머지 470 cm 구간에만 개공눈을 설치하였다. 집수관은 두께 4 mm인 폴리에틸렌 파이프를 제작하였고, 내경은 43.5

mm였으며, 개공률은 20%였다. 따라서 여과수의 집수관 유입시 저항은 문제되지 않을 것으로 판단되었다.⁶⁾ 수평집수관 외피에는 수두측정을 위해 마노미터를 설치하였다. 그 설치간격은 집수관 최상류의 한 구간에서는 70 cm로 그리고 나머지 구간에서는 모두 각각 50 cm씩으로 하였고, 내경 2 mm, 두께 0.5 mm인 비닐튜브를 사용하였다. 또한, 모래통의 한쪽 끝에서 1 m 이격하여 집수정을 설치하였으며, 집수정의 규격은 길이 1.0 m, 폭 1.5 m, 높이 3.0 m이었고 철판으로 제작하였다. 모래통과 집수정은 같은 수평면에 설치되었다. 모래통과 집수정 사이는 수평집수관과 같은 규격의 무공관을 사용하여 수평집수관을 집수정에 연결함으로써 집수관에 흘러든 여과수가 집수정으로 수집되도록 하였다. 집수정에는 개폐식 밸브가 장착된 내경 6.5 cm의 원형 배수구를 7공 설치하였으며, 배수구의 중심의 위치는 집수정 바닥면으로부터 각각 2.50 m, 2.25 m, 2.00 m, 1.75 m, 1.50 m, 1.25 m, 1.00 m였다. 본 실험장치에 사용된 철판은 두께가 6 mm였으며, 구조적인 안정을 위하여 실험장치의 외곽에는 보강재를 추가하였다. 실험장치의 개요도는 Fig. 3에 나타내었다.

실험장치는 한국수자원공사 고령권 관리단의 야외공터에 설치하였고, 낙동강에서 취수한 정수장 유입원수를 실험에 사용하였다. 실험방법은 모래표면에 정수장 유입수를 지속적으로 공급하여 그 수심을 약 19 cm로 유지하면서 집수정의 2.25 m 높이의 배수구를 열어 집수정의 수위와 마노미터의 수두가 일정한 값으로 수렴한 후 산출유량과 집수관에 설치된 마노미터의 수두 값들을 관측하였다. 이후 집수정의 배수구 위치를 한 단계씩 낮추어 앞의 과정을 반복하였으며, 배수위치 1.0 m까지 실험을 수행하였다. 산출유량 측정은 초시계와 매스실린더를 사용하였으며, 실험은 2012년 11월 30일부터 3일간 수행하였다.

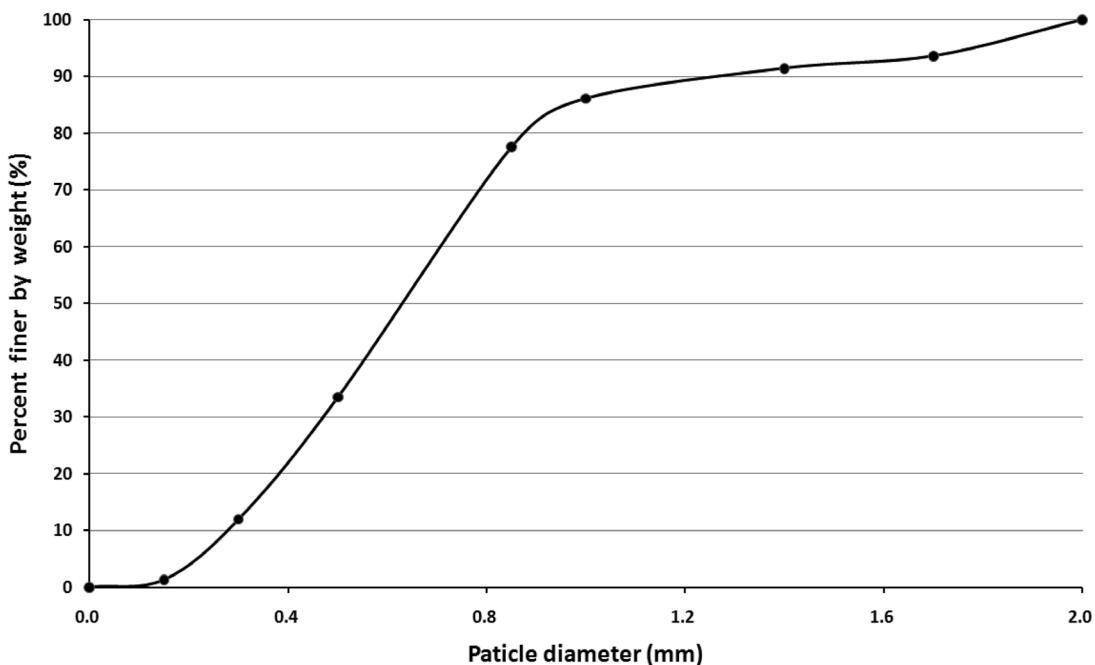


Fig. 2. Particle size distribution of the sand used in the experiment.

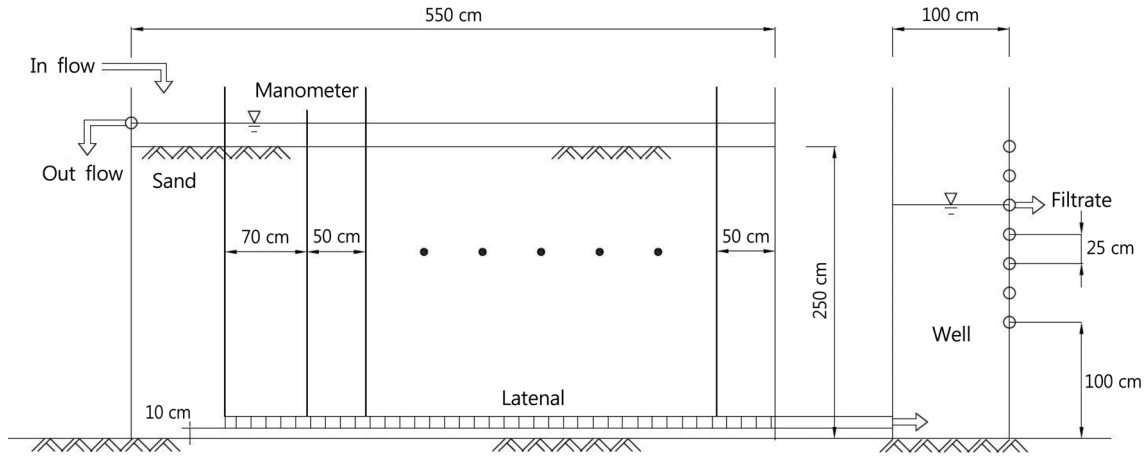


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental apparatus.

3. 결과 및 고찰

모래통과 집수정 사이의 수위차 즉, 집수정에서의 수위저하가 커질수록 산출유량과 이에 따른 수평집수관에서의 출구유속이 증가하였으며, 여러 수위저하 값에서 수평집수관에서의 출구유속과 집수관에서의 수두분포를 Table 1에 나타내었다. 여기서 수두분포는 집수관 하류측 끝 즉, 모래통의 벽을 기준으로 하였다. 또한, Table 1에서 출구유속이 0.26 m/sec, 0.55 m/sec, 그리고 0.86 m/sec인 경우에 대해 지면에서 관측한 수두값을 Fig. 4에 나타내었다. 모든 경우에 출구에 다가갈수록 수평집수관 표면의 수두는 점점 더 심하게 감소 또는 왜곡되며, 출구유속이 클수록 이 현상이 더 심화됨을 알 수 있었다. 이는 집수관에서의 축방향 유량과 유속이 출구에 가까울수록 점차 증가하고 이에 따라 축방향 흐름에 대한 마찰손실이 더 커지기 때문이다.^{24,26)} 이를 다른 관점에서 보면, 집수정에서의 수위저하가 마찰손실로 인해 수평집수관 전체에 걸쳐 그대로 전달되지 못하고 특히 집수정에서 먼 곳에는 수위저하가 상당히 감소하여 전달되며, 집수관의 출구유속이 커질수록 이 감소된 정도는 더 커진다는 것이다. Kim²⁴⁾이 제시하였듯이, Table 1에서 출구유속이 1

m 이상인 경우에는 수평집수관 양 끝에서의 수두차가 매우 커서 수평집수관 전체에 걸쳐 균일한 수두분포로 가정하기 어렵다는 것을 알 수 있었다.

Table 1. Hydraulic head distribution along the lateral in a pilot-scale riverbank filtration according to the exit velocity

Drawdown at the well (cm)	43.0	76.0	91.0	115.5	140.0	164.7
Exit velocity (m/s)	0.26	0.41	0.55	0.70	0.86	1.00
Distance to the lateral end (cm)						
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	2.5	3.1	4.8	8.6	10.0	11.4
100	4.2	4.4	7.3	12.1	15.2	19.7
150	4.4	5.1	9.4	14.6	18.1	22.9
200	4.5	5.7	10.5	16.1	20.1	25.0
250	4.6	6.0	11.0	16.7	21.4	26.6
300	4.8	6.4	11.6	17.2	22.3	28.0
350	5.0	6.8	12.1	17.7	22.9	29.2
400	5.2	7.2	12.4	18.1	23.2	29.8
470	5.3	7.6	13.1	18.5	23.4	30.0

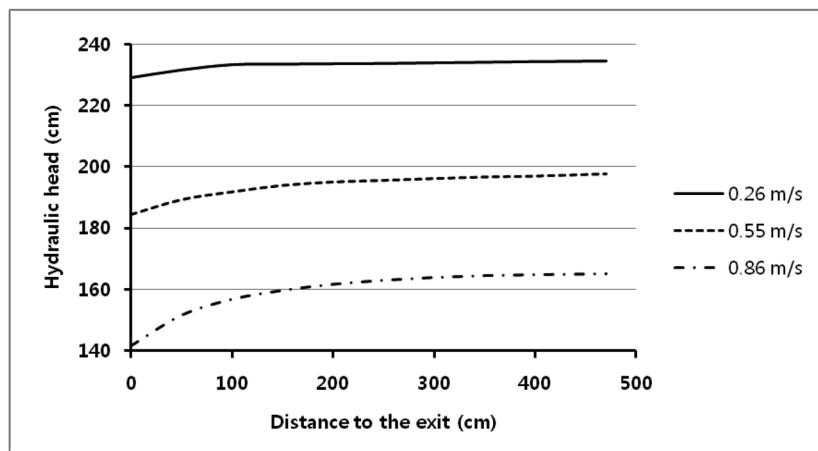


Fig. 4. Hydraulic head distributions along a pilot-scale lateral according to the exit velocity.

Kim²⁵⁾은 규모가 다른 두 수평집수관에서 출구유속이 같은 경우 작은 집수관과 큰 집수관에서의 수두손실의 비를 구하는 식을 유도하여

$$\frac{\Delta h_p}{\Delta h_m} = \frac{n_p^2 \Delta x_p}{n_m^2 \Delta x_m} = \frac{D_p^{4/3}}{D_m^{4/3}} \quad (1)$$

로 나타내었다. 여기서 Δh 는 수평집수관의 Δx 에서 발생하는 손실수두(m), n 은 Manning의 조도계수(-), Δx 는 두 수평집수관에서 상대적 위치가 같은 두 지점 사이의 거리(m), D 는 수평집수관의 직경(m)을 나타내고 아래첨자 p 와 m 은 각각 큰 수평집수관(prototype)과 작은 수평집수관(model)을 나타낸다. 이 식은 크기가 다른 두 수평집수관에서 출구유속이 같을 때, 두 집수관의 수두손실이 길이 증가에는 선형으로 비례하지만 직경 증가에는 그 4/3승에 반비례하여, 큰 집수관에서의 직경 증가에 의한 마찰감소의 효과가 길이 증가에 의한 마찰증대보다 더 우세함을 나타내고 있다.

Kim²⁴⁾이 수행한 길이 60 cm, 내경 20 mm인 수평집수관을 이용한 실험실 규모의 실험에서 출구유속이 0.85 m/sec 일 때 수평집수관 전체에서 발생한 수두손실은 6.5 cm이었다. 이 자료로부터 출구유속이 0.85 m/sec일 때 본 연구에서 수행한 파일럿 규모의 수평집수관 전체길이에서 수두손실을 식 (1)에 의해 계산하면

$$\Delta h_p = \frac{\left(\frac{n_p}{n_m}\right)^2 \left(\frac{470}{60}\right)}{\left(\frac{4.35}{2.0}\right)^{4/3}} 6.5 = 18.07 \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^2 \quad (2)$$

이 된다. Table 1에서 출구유속 0.85 m/sec인 경우 수평집수관 470 cm에서 발생하는 마찰손실수두를 선형보간법에 의해 구하면 23.1 cm로, 두 수평집수관의 특성이 같다면 이 값은 식 (2)의 결과와 거의 일치할 것이다.

한편, 수평집수관에서의 흐름은 다수의 줄눈(slot)을 통해 여과수가 상당한 유속을 가지고 축방향 흐름에 직각으로 유입하며, 줄눈을 통한 유입으로 인해 축방향 유량이 점차 증가하지만 또한 이는 축방향 흐름에 저항이 되기도 하는 특수한 관수라 할 수 있다. Kim²⁷⁾은 이러한 수평집수관에서의 축방향 흐름에 대한 저항을 실험과 모델링을 통해 연구하여 저항을 Manning의 조도계수로 나타내었으며, 조도계수는 집수관의 직경이나 길이와는 상관관계가 작지만 출구유속과는 상관관계가 매우 커서, 출구유속이 같은 경우 직경이 달라도 조도계수는 큰 차이가 없다고 하였다. 또한, Kim²⁵⁾은 개공률, 개공형상 등의 특성이 같고 출구유속이 같은 수평집수관에서는 집수관의 직경이 클수록 마찰저항이 작아진다고 하였다. 그런데 Table 1에서 얻은 출구유속 0.85 m/sec에 대한 전체 수두손실 23.1 cm와 식 (2)의 계산치가 같기 위

해서는 n_p/n_m 값이 1.13가 되어야 하고, 이는 이들의 연구와는 다소 다른 결과라고 할 수 있다. 이러한 결과는 Kim²⁴⁾과 본 연구에서의 실험조건 특히 개공률의 차이에 크게 기인하는 것으로 보이며, Kim²⁴⁾의 연구에서는 개공률의 크기가 5 mm였으나 본 연구의 실험에서는 24 mm로 커서 개공률이 큰 점이 큰 조도계수의 원인인 것으로 판단되었다(두 경우 모두 집수관 외부에 철제 망사를 씌워 모래의 유입을 방지하였다). 이와 유사한 현상은 석유시추분야에서도 보고된 바 있으며, Schulkes와 Utvi은 실험을 통해 각 개공률으로부터의 유입유량(flux)이 작은 경우 이는 축방향 흐름에 대한 저항을 감소시키는 역할을 하지만 유입유량이 큰 경우에는 축방향 흐름에 저항으로 작용한다고 하였다.²⁸⁾ 따라서 실험조건에 따른 다소의 오차를 허용한다면, 출구유속이 같은 경우 작은 집수관에서의 손실수두로부터 큰 집수관에서의 손실수두를 구하는 Kim²⁵⁾의 방법은 타당하다고 볼 수 있을 것이다.

강변여과에서 실규모 수평집수관 설계시 또는 산출유량 결정시 집수관 구간별로 적용해야 하는 수두값을 결정할 필요가 있으며, 그 과정을 예를 들어 설명한다. 길이 100 m, 직경 30 cm인 수평집수관의 설계산출유량이 4,275 m³/day인 경우 이 수평집수관에서 발생하는 전체 수두손실을 식 (1)과 Table 1의 관측치로부터 구할 수 있다. 이를 위해 설계산출유량에 해당하는 출구유속 0.55 m/sec를 먼저 얻으며, 이와 동일한 출구유속을 가지는 실험결과를 Table 1에서 취한다. 이 출구유속에서 길이 4.7 m, 직경 4.35 cm인 파일럿 규모의 집수관 전체에서 발생한 수두손실이 18.5 cm이므로, 두 집수관에서의 조도계수를 같다고 가정하여 이 값들을 식 (1)에 대입하면 실규모인 길이 100 m, 직경 30 cm인 집수관 양 끝에서의 손실수두가 30.0 cm로 계산된다. 집수정의 수위저하가 큰 경우에는 약간의 오차를 감수하고 이 손실수두를 무시하여 전체 수평집수관에서의 수두값이 일정하다고 할 수도 있을 것이다. 그러나 보다 정밀한 계산을 위해서는 집수관에서의 수두분포를 구하여 수평집수관 각 부분에서의 유입률을 따로 계산하면 된다. 실규모 수평집수관에서의 위치에 따른 수두값은 Table 1의 수두분포형태에 계산된 손실수두 값 30 cm를 적용하면 얻을 수 있다. 이 수두 값들을 수평집수관에 적용하되 집수관을 일정수두 경계조건으로 보고 수치해로 해석하면 우물의 적정 수위저하 값을 계산할 수 있고 또는 수위저하가 주어진 경우에는 앞의 과정을 반복하여 시행착오법으로 산출유량을 구할 수 있다. 여기서 두 집수관의 조도계수를 같다고 가정했으나, 앞에서 살펴본 이 Table 1의 관측치는 개공률이 큰 집수관을 사용하여 얻었으므로 조도계수와 손실수두가 다소 커서 이 자료를 이용하여 예측한 실규모에서의 전체 손실수두는 실제보다는 다소 큰 점에 주의해야 할 것이다.

4. 결론

Kim²⁵⁾이 개발한 이론 즉, 출구유속이 같고 크기가 다른 두

수평집수관에서 작은 집수관의 손실수두 값으로부터 큰 집수관의 손실수두 값을 구하는 방법은 타당함을 알 수 있었다. 이들의 이론을 적용하여 본 연구에서 관측된 파일럿 규모의 수평집수관에 대한 수두분포 측정치를 이용하여 실규모 집수관에서의 수두분포를 구하는 방안을 예를 들어 설명함으로써 강변여과의 수평집수관 설계에 도움이 되도록 하였다.

KSEE

참고문헌

1. Ray, C., Melin, G. and Linsky R. B. (ed.), "Riverbank filtration-Improving source-water quality," Kluwer Academic Publishers, pp. 29~34(2002).
2. Daegu Waterworks Headquarters, "100 years of Water Supply History," p. 10(2006).
3. Hunt, H., Schubert, J. and Ray, C., "Chap. 1. Conceptual design of riverbank filtration system," in Riverbank filtration-Improving source-water quality, edited by Ray, C., Melin, G. and Linsky R. B., Kluwer Academic Publishers, pp. 19~27(2002).
4. Hantush, M. S., "Hydraulics of wells," in Advance in Hydroscience Vol. 1, edited by Ven Te Chow, Academic Press, New York, pp. 281~432(1964).
5. Fetter, C. W., "Applied Hydrogeology," Macmillan College Publishing Company, Inc., New York(1994).
6. Water and Power Resources Service, Ground water manual, 2nd Ed., U. S. Department of the Interior, U.S. Government Printing Office, Denver, Co., USA(1981).
7. Milojevic, M., "Radial collector wells adjacent to the river bank," J. of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp. 133~151 Nov. (1963).
8. Hantush, M. S. and Papadopulos, I. S., "Flow of ground water to collector wells," *Proc. Am. Soc. Civil Engrs.* **88**, HY5, 221~244(1962).
9. Zhan, H., Wang, L. V. and Park, E., "On the horizontal-well pumping tests in anisotropic confined aquifers," *J. Hydrol.*, **252**(1/4), 37~50(2001).
10. Zhan, H. and Cao, J., "Analytical and semi-analytical solutions of horizontal well capture times under no-flow and constant-head boundaries," *Adv. Water Res.*, **23**(8), 835~848 (2000).
11. Zhan, H. and Park, E., "Horizontal well hydraulics in leaky aquifers," *J. Hydrol.*, **281**, 129~146(2003).
12. Langseth, D. E., Smyth, A. H. and May, J., "A method for evaluating horizontal well pumping tests," *Ground Water*, **42**(5), 689~699(2004).
13. Fletcher, C. A. J., "Computational Techniques for Fluid Dynamics 1," 2nd ed., Springer-Verlag, New York(1991).
14. Ray, C., "Modeling RBF efficacy for mitigating chemical shock loads," *J. AWWA*, **96**(5), 114~128(2004).
15. Chen, C., Wan, J. and Zhan, H., "Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well," *J. Hydrol.*, **281**(1/2), 159~171(2003).
16. Wang, W. and Zhang, G., "Numerical simulation of ground-water flowing to horizontal seepage wells under a river," *Hydrogeol. J.*, **15**, 1211~1220(2007).
17. Tarshish, M., "Combined mathematical model of flow in an aquifer-horizontal well system," *Ground Water*, **30**(6), 931~935 (1992).
18. Mohamed, A. and Rushton, K., "Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model," *J. Hydrol.*, **329**, 98~109(2006).
19. Shamrukh, M. and Abdel-Wahab, A., "Chap. 2 Water pollution and riverbank filtration for water supply along River Nile, Egypt," in "Riverbank filtration for water security in desert countries," edited by Ray, C. and Shamrukh, M., Springer, pp. 5~28(2009).
20. Schubert, J., "Chap. 3. German experience with riverbank filtration systems," in "Riverbank Filtration-Improving source-water quality," edited by Ray, C., Melin, G. and Linsky, R. B., Kluwer Academic Publishers, pp. 35~48(2002).
21. Kim, S.-H., "Comparison of Riverbank and Riverbed Filtration in Korea," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(10), 1154~1162(2007).
22. 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," Master's Thesis, Graduate School of Environment & Public Health Studies, Yeungnam University(2012).
23. 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," Department of Environmental Engineering, Yeungnam University, Water Resources Investigation & Planning Department, Korea Water Resources Corporation, *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(7), 536~543(2011).
24. 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).
25. Kim, S. H., Ahn, K. H., Prasher, S. and Patel, R., "Extending horizontal well, riverbed filtration design velocity from laboratory-scales to practical scales," *Canadian Water Resources Journal*, in press(2013).
26. Olson, R. M. and Wright, S. J., "Essentials of Engineering Fluid Mechanics, 5th ed., Harper and Row Publishers," New York, USA(1990).
27. Kim, W.-C., Kim, S.-H., "Roughness Coefficient of Collector Well Lateral in a Model Riverbed Filtration," *Department of Environ. Eng., Yeungnam University, J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **29**(2), 176~183(2007).
28. Schulkes, R. M. and Utvik, H. O., "Pressure drop in a perforated pipe with radial inflow: single-phase flow," *SPE J.*, **3**(1), 77~85(1998).