

하상여과 모형에서 수평집수관의 조도계수

김우철 · 김승현[†]

영남대학교 환경공학과

(2006년 7월 18일 접수, 2007년 1월 30일 채택)

Roughness Coefficient of Collector Well Lateral in a Model Riverbed Filtration

Woo-Chul Kim · Seung-Hyun Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

ABSTRACT : In order to analyze the experimental results obtained from the model riverbed filtration performed by Ahn et al.¹⁹⁾ a mathematical model was developed to simulate the flow through the lateral. The discharge rates at each section of the lateral measured by Ahn et al.¹⁹⁾ were compared with the model predictions, and they matched favorably. The Manning's roughness coefficients of all the laterals employed in the study of Ahn et al.¹⁹⁾ were determined using the model. Results show that the roughness coefficient becomes larger with the increase in the entrance velocity to the collector well, and that the coefficient ranges from 0.012 to 0.015 under the normal operational conditions of the riverbed filtration. Results also show that the coefficient becomes smaller as the lateral diameter increases.

Key Words : Riverbed Filtration, Collector Well Lateral, Roughness Coefficient, Lab-scale Experiment, Mathematical Model

요약 : 안 등¹⁹⁾이 보고한 모형 하상여과정의 수평집수관에 대한 여러 가지 측정치를 해석하기 위해 집수관에서의 흐름을 묘사하는 수학적 모델을 개발하였다. 집수관 각 부위에서의 여과수 유입을 측정치와 본 연구에서 개발된 모델 예측치를 비교하였으며, 두 값은 잘 부합하였다. 이 모델을 이용하여 수평집수관 내부의 흐름에 대한 저항 계, 조도계수를 구했고, 여러 실험조건에서 얻은 집수관의 조도계수를 분석한 결과 집수정 유입유속이 커짐에 따라 조도계수는 증가하지만 정상적인 하상여과의 경우에는 0.012-0.015로 거의 일정한 값을 알 수 있었다. 또한, 집수관의 직경이 커지면 조도계수는 감소함을 알 수 있었다.

주제어 : 하상여과, 수평집수관, 조도계수, 모형실험, 수학적 모델

1. 서론

강변여과를 이용한 간접취수법이 우리나라에 도입된 1990년대 중반 이후 양질의 상수원수 확보 또는 하천수질 개선을 위해 강변여과와 이의 일종인 하상여과가 활발하게 연구 및 개발되고 있다.^{1~5)} 강변여과는 유럽에서 널리 사용되어 오던 상수생산방법이며,⁶⁾ 최근에는 미국에서도 상수원수 생산방법으로 많이 개발되고 있다.⁷⁾ 강변여과에는 크게 3종류의 우물 형태가 많이 사용되어 왔으며, 이들은 물웅덩이(pit well), 수직정, 그리고 수평집수정으로 이중에서 현재는 수직정과 수평집수정이 널리 사용되고 있다.⁸⁾ 우리나라에서 강변여과를 적용할 경우 하천 주변의 층적 대수층의 투수계수가 작으므로^{9,10)} 많은 양의 여과수를 생산하기 위해서는 양수정을 하천에 근접시키는 하상여과가 유리하며¹¹⁾ 양수정의 형태는 수평집수정을 사용하는 것이 유리하다.⁸⁾

강변/하상여과정의 설계에서 가장 중요한 과정은 산출유량의 예측이라 할 수 있다. 강변여과의 역사가 오래된 유럽에

서는 특별한 공식이 없이 기술자들의 경험에 바탕한 설계방법들이 적용되어 왔다.¹²⁾ 수평집수정의 산출유량 예측을 위한 공식은 Hantush와 Papadopoulos¹³⁾가 최초로 유도하였으며, 미국의 강변/하상여과 산업에서 널리 사용되어 왔다.¹⁴⁾ 이후 많은 연구자들이 다양한 대수층 조건하에서 수평집수관의 산출유량을 예측하는 공식을 유도하였다. 하상여과와 가까운 형태의 수평집수관 해석은 Zhan과 Park¹⁵⁾에 의해서도 수행되었으며, 그들은 저수지 아래의 대수층에 설치된 수평집수관 주변에서의 수리학적 거동에 대한 해석해를 유도하였다. 그러나, 대부분의 연구자들은 수평집수관을 연속된 점원 또는 선원으로 보았고 여과수 유입율은 집수관의 위치에 상관없이 일정하다고 가정하였다. Park과 Zhan¹⁶⁾은 집수관의 직경을 고려하였고 집수관 내부의 불 저장효과와 집수관 주변의 여과사층의 효과를 고려한 식을 유도하였으나 집수관 내부의 흐름을 고려하지는 않았다.

Chen 등¹⁷⁾은 집수관 주변의 지하수 흐름과 집수관 내부의 흐름을 동시에 고려하는 모델을 수립하여 해석하고 모래통 실험을 통해 이를 검증하였으며, 지금까지 많은 연구자들이 수평집수관 전체 길이에 걸쳐 적용한 일정유입을 가정이 사실과 다름을 보였고, 일정유입을 가정이나 일정수두 가정이

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

Fax: 053-812-2540

불필요하다고 결론지었다. Mohamed와 Rushton¹⁸⁾은 수치모델을 이용하여 수평집수관 주변의 지하수 흐름과 집수관 내부의 흐름을 동시에 해석하였고, 이를 실험모의 양수정에서의 측정결과와 비교하였다. 이들은 지금까지 수평집수관 해석에 사용되었던 일정유입을 가정이나 일정수두 가정이 전적으로 옳지는 않지만, 수평집수관이 짧은 경우에는 일정유입을 가정이 부분적으로 적용될 수 있다고 하였다. 안 등¹⁹⁾은 여러 가지 직경 및 길이의 집수관과 투수계수가 다른 2종류의 모래를 이용한 모래통 실험을 수행하였고, 대수층에서의 흐름에 대한 저항과 집수관 내부흐름의 저항의 균형에 의해 집수관에서의 유입을 분포가 결정되며, 대수층 저항이 집수관 저항에 비해 상대적으로 큰 경우에는 일정유입을 가정이나 일정수두 가정이 근사적으로 적용될 수 있지만, 대수층 저항에 비해 집수관 저항이 상대적으로 큰 경우에는 집수정에 가까울수록 수두는 감소하고 유입율은 증가한다고 하였다. 또한, 그들은 이들 두 저항의 상대적 크기와 집수관에서의 수두 및 유입을 분포를 결정하는 인자는 수평집수관 내부의 축방향 유속이라고 결론지었다.

수평집수관의 완벽한 설계를 위해서는 지금까지 많이 연구되어왔던 수평집수관 주변의 대수층에서의 흐름 이외에도 집수관과 대수층 사이에 존재하는 여과사층에서의 흐름과 집수관 내부의 흐름이 동시에 고려되어야 한다.¹⁸⁾ 이 중에서 수평집수관 내부의 흐름을 해석하기 위해서는 집수관에서의 축방향 흐름에 대한 저항을 정확히 정량화할 필요가 있으며, 아직까지 이에 대한 연구는 수행된 바 없다.

본 연구에서는 안 등¹⁹⁾이 하상여과를 모사하는 모래통 실험을 수행하여 발표한 일부의 자료와 미발표된 자료를 모두 이용하여 집수관 내부에서 축방향 흐름에 대한 저항을 정량화하였다. 그 방법으로는 수학적 모델을 개발하여 집수관 외 부표면에서의 수두분포로부터 집수관 각 부위에서의 유입을 분포를 계산하였으며, 이를 실험에서 얻은 측정치와 비교함으로써 집수관 내부저항을 가장 잘 묘사하는 조도계수를 결정하였다. 결정된 조도계수에 대한 분류 및 평가도 수행하였다.

2. 수학적 모델전개

하상여과에서 수평집수관을 사용할 경우 하천수는 수두경사를 따라 대수층을 통과한 후 집수관으로 유입되어 집수정으로 흘러든다. 하상여과에서의 집수관 모식도를 집수관의 바깥쪽 끝을 원점으로 하는 1차원 좌표계를 사용하여 Fig. 1에 나타내었다. 하천수가 대수층을 통과하여 수평집수관에 접근할 때 수두손실이 발생하며, 하천수위에서 이 손실수두를 제외한 잔류수두가 Fig. 1의 $h(x)$ 이다. $h(x)$ 는 대수층의 투수계수와 집수관의 깊이, 그리고 대수층 통과시의 유속에 따라 달라지며, 위치의 함수로 그 단위는 m이다. 대수층을 통해 흘러온 여과수는 집수관을 통과하면서 축방향으로 흐름의 방향이 바뀌게 된다. 대수층에서의 여과수의 속도수두와 집수관 통과시 발생하는 수두손실을 무시하면 잔류수두 $h(x)$ 는

Bernoulli의 정리에 의해 집수관 내부에서 압력수두와 속도수두로 나뉜다. 이를 수식으로 나타내면

$$h(x) = \frac{v(x)^2}{2g} + \frac{p(x)}{\gamma} \quad (1)$$

이 된다. 여기서 $v(x)$ 는 축방향 유속(m/sec), g 는 중력가속도(m/sec²), $p(x)$ 는 집수관 내부의 압력(N/m²), 그리고 γ 는 물의 비중량(N/m³)을 나타낸다. 우변의 첫째와 둘째 항은 각각 속도수두와 압력수두이다. 식 (1)에서 집수관 내부의 흐름은 1차원으로 가정하였다.

수평집수관 내부의 유속은 층류에서 잘 발달된 난류까지 다양한 흐름영역을 보인다.¹⁷⁾ 모든 경우에 수두손실은 유속의 함수이지만 각 흐름영역에서 차이를 보이며, Reynolds수 (Re)에 따라

$$\begin{aligned} head\ loss &\propto v^{1.0} & \text{if } Re \leq 2,300 \\ &\propto v^{1.75} & \text{if } 3,000 \leq Re \leq 100,000 \\ &\propto v^{2.0} & \text{if } 100,000 \leq Re \end{aligned} \quad (2)$$

로 정리될 수 있다.²⁰⁾ 한편, 수평집수관의 용도는 다양하여 오염토양이나 오염지하수의 처리에 적용되는 경우에는 그 산출유량이 매우 적다.²¹⁾ 그러나 대량의 양수가 필요한 우리나라에서의 상수생산이나 하천수질개선의 경우 그 유량과 유속은 매우 커서 수평집수관 내부의 흐름을 층류로 유지하는 것은 경제성이 크게 떨어진다. 이에 더하여 수평집수관으로 유입되는 여과수는 집수관의 축방향 흐름과 수직으로 부딪히고 이에 의해 와도는 더욱 증가하므로¹⁸⁾ 집수관 내부의 흐름에서 실제의 와도는 식 (2)의 Reynolds 수에 의해 표시되는 와도보다 더 클 것으로 기대된다. 이러한 이유로 본 연구의 경우 수평집수관 내부에서의 흐름은 모두 완전히 발달한 난류로 간주하며, 이 경우 계산이 간편해지는 이점도 있다. 축방향 유속은 Manning의 공식을 이용하여

$$v(x) = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (3)$$

로 나타낼 수 있고, 여기서 n 은 Manning의 조도계수(-)로 집수관의 개공형상과 여과수의 유입속도 등에 따라 달라질 것이며, R 은 수력반경(m)으로 원관의 경우 직경의 1/4이고, I 는 수력경사(-)를 나타낸다.²⁰⁾ 수력경사는

$$I = -\frac{1}{\gamma} \frac{dp(x)}{dx} \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 식 (4)를 식 (3)에 대입하면

$$-\frac{dp(x)}{dx} = v(x)^2 n^2 \gamma R^{-4/3} \quad (5)$$

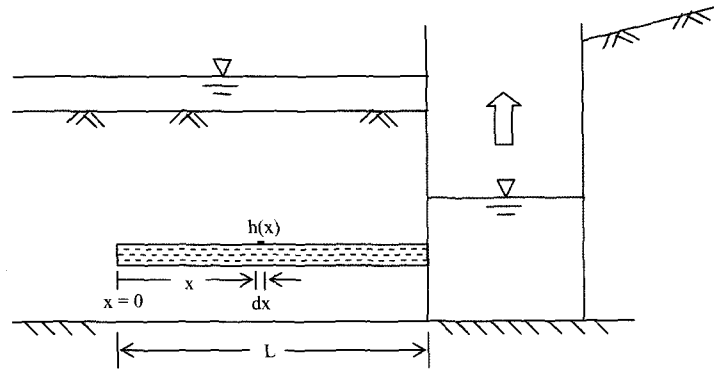


Fig. 1. Coordinate system of a collector well lateral used in riverbed filtration.

을 얻을 수 있다. 식 (1)을 x 로 미분하고 여기에 식 (5)를 대입하면

$$\frac{dv(x)^2}{dx} - 2gn^2R^{-4/3}v(x)^2 = 2g \frac{dh(x)}{dx} \quad (6)$$

이 되고, $h(x)$ 의 분포를 알면 이 식은 $v(x)^2$ 에 대한 1계 미분 방정식이므로 이를 해석하여 $v(x)$ 를 구할 수 있다.

집수관의 미세구간 dx 에서의 물 수지 방정식을 세우면

$$q(x) = R \frac{dv(x)}{dx} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 $q(x)$ 는 집수관의 단위 표면적당 여과수 유입율($m^3/m^2 \cdot sec$)이다. 하나의 집수관을 통해 집수정으로 유입되는 유량은 집수관 전체 표면에서 유입되는 여과수의 양과 같으므로

$$Q = \int q(x)\pi D dx \quad (8)$$

이 성립한다. 여기서 Q 는 집수관에서 집수정으로 유입되는 유량(m^3/sec)을 나타내고, D 는 집수관의 내경(m), 그리고 L 은 집수관의 길이(m)를 나타낸다. 식 (8)을 집수관 전체가 아닌 일정구간에 걸쳐서만 적용하면 수평집수관의 일정부분에서 유입되는 여과수의 유입율을 계산할 수 있다.

3. 안 등¹⁹⁾의 모래통 실험 요약

안 등¹⁹⁾은 폭 20 cm, 길이 60 cm, 그리고 높이 50 cm인 모래통 3개와, 길이만 80 cm로 다른 1개의 모래통을 이용하여 하상의 층적 대수층을 모사하였다. 모래통에는 집수관을 설치하여 하상여과를 모사하였으며, 실험에 사용된 집수관의 내경은 모두 3종류로 3.0 cm, 2.0 cm, 그리고 1.0 cm이었다. 집수관은 바닥에서 10 cm 높이에 길이방향으로, 그리고 모래통 폭의 가운데에 수평으로 설치하였다. 집수관의 외부 표면에는 외경 3.0 mm인 피조미터를 20 cm 간격으로 설치하여 압력수두를 측정하였다. 모래통은 46 cm 깊이로 모래를 채웠고, 모래통에 연결하여 집수정을 운영하였다. 집수정은 그 바닥으로부터 15 cm, 25 cm, 그리고 35 cm 높이에 직경 5 cm의 출구를 설치하였다. 모래통은 집수관으로 연결되어 하나의 모래통처럼 기능하도록 하였다. 모래통 운영시 모래통의 상부에서 수돗물을 공급하여 모래표면 위의 수심을 3 cm로 유지하였다. 실험에 사용된 모래는 두 종류였으며, 그 투수계수는 각각 0.155 cm/sec와 0.044 cm/sec이었다. 실험 장치의 개요는 Fig. 2에 나타내었다.

안 등¹⁹⁾은 실험을 4단계로 나누어 수행하였다. 첫 단계에서는 모래통에 내경 2.0 cm인 집수관을 설치하여 전체 유효 길이를 260 cm로 운영하였다. 집수정에서 가장 먼 곳에는 80 cm길이의 모래통을 위치시켰다. 사용된 모래의 투수계수는 0.155 cm/sec이었다. 모래통 운영시 집수정의 수위에 따라 집수정에서의 산출유량, 집수관 표면에서의 수두분포, 그리고 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다.

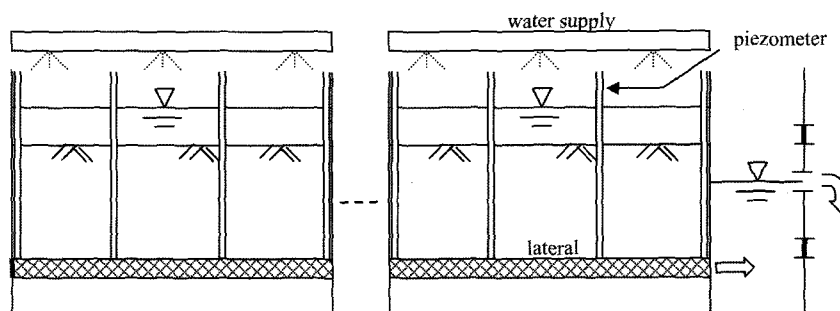


Fig. 2. Schematization of the model lateral(Ahn et al.¹⁹⁾.

두번째 단계에서는 첫번째 단계의 실험에서 집수정에서 먼 쪽부터 모래통을 하나씩 제거하면서 집수정에서의 수위에 따라 산출유량, 집수관 표면에서의 수두분포, 그리고 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다. 세번째 단계에서는 60 cm 길이인 모래통 3조를 연결하여 유효길이 180 cm로 운영하였으며, 집수관의 직경을 3.0 cm, 2.0 cm, 그리고 1.0 cm로 바꾸어 가면서 집수정에서의 수위에 따라 산출유량, 집수관에서의 수두분포, 그리고 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다. 사용된 모래는 앞의 실험과 같았다.

네번째 단계에서는 세번째에서와 같이 3조의 모래통을 운영하였다. 집수관의 직경은 2.0 cm이었고, 투수계수가 0.044 cm/sec인 모래를 사용하여 모래통을 운영하였으며, 집수정에서의 수위에 따라 산출유량, 집수관에서의 수두분포와 각 모래통에서의 유입유량을 측정하였다. 실험에 관한 보다 구체적인 설명은 안 등¹⁹⁾에 있다.

4. 실험결과 및 해석

첫 단계의 실험결과는 Fig. 3에 나타내었다. 안 등¹⁹⁾에서술되어 있듯이, 집수정에서의 수위저하가 커짐에 따라 산출유량이 증가하였으나 산출유량의 증가가 집수관 길이의 증가를 따르지 않는 못하였다. 이는 집수정에서의 수위저하 효과가 집수정에서 멀어질수록 급속히 감소하기 때문이며, 집수관에서의 축방향 흐름에 대한 저항이 그 원인이다. 여과수가 집수관에 유입되면 집수관에서의 축방향 흐름은 증가하는 유량에 따라 점차 가속되면서 집수정으로 흐른다. 그런데 식 (2)에서 알 수 있듯이 난류에서의 저항은 유속의 제곱에 비례하므로 축방향 흐름에 대한 저항은 집수정에 근접할수록 크게 증가하며, 이로 인해 집수정에서의 수위저하 효과가 집수관 전체에 전달되지 못하고 Fig. 3에서와 같이 집수정에 근접할수록 더 크게 꺾이는 곡선으로 변한다.

수평집수관 표면에서의 수두분포를 다항식으로 나타낼 수 있으며, Fig. 3에서 집수정의 수위가 0.170 m인 경우에는

$$h(x) = -0.0090x^3 - 0.0042x^2 - 0.0003x + 0.4535 \quad (9)$$

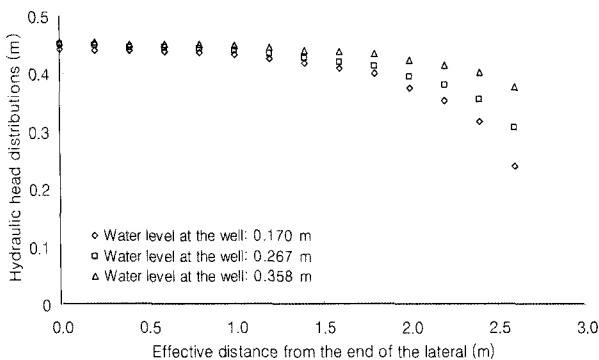


Fig. 3. Hydraulic head distributions according to the water level at the well(lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, data from Ahn et al.¹⁹⁾).

가 된다. 이 식을 식 (6)에 대입하여 $v(x)^2$ 에 대한 미분방정식을 얻으며, 이는 수치해법을 적용하여 해석하였다. 본 연구에 사용된 수치해는 Runge-Kutta법²²⁾이었으며, 격자의 크기는 전체 영역의 1/100로 하였다. 다른 우물수위에 대해서도 식 (9)와 같은 수두분포곡선을 구했으며, 이를 식 (6)에 대입하고 해석하여 집수관에서의 축방향 유속분포를 구했고 이를 Fig. 4에 나타내었다. 축방향 유속은 대부분의 구간에서 거의 선형으로 증가하다가 집수정 부근에서 급적으로 증가함을 알 수 있다. 여기서 선형증가는 여과수 유입율이 집수관에서의 위치에 따라 변하지 않고 일정함을 나타낸다. Fig. 4에서 집수관의 끝에서의 유속 $v(0)$ 은 0이 아니며, 이는 집수관의 끝에서 집수관을 수직으로 통과한 여과수가 원통형 집수관의 중심으로 모여드는 유속의 대표치를 나타낸다. 이 유속은 각 모래통에서의 유입유량의 실측치를, $v(0)$ 와 Manning의 n 값을 변화시키면서 해당되는 모래통 구간별로 식 (8)을 계산한 유입유량 계산치들과 비교하여 두 값들을 가장 잘 일치시키는 $v(0)$ 와 n 값을 시행착오법으로 구한 것이다. Fig. 3에서 집수정의 수위가 0.170 m인 경우에 대한 유입유량의 실측치와 계산치의 비교는 Fig. 5에 나타내었다. 두 유입유량 값이 보이는 오차는 Manning 공식의 부정확, 집수관의 한 단면에서는 축방향 유속은 동일하다는 가정, 모래통에서의 투수계수가 균일하지 않은 점 등에 기인하는 것으로 볼 수 있다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 집수관으로의 여과수 유입은 집수정에 근접할수록 증가하고, 여과수가 집수관 내부의 축방향 흐름에 직각으로 유입되므로 축방향 흐름에 대해서는 저항의 증가로 작용할 것이다. 따라서 조도계수도 이에 따라 변화할 가능성이 있다. 그러나, 여과수 유입율이 커지면 이에 따라 축방향 유속도 증가하여 여과수 유입에 의한 저항을 상쇄하는 효과가 있을 것으로 기대되어 집수관의 위치에 상관없이 일정한 값으로 가정하였으며, 이에 의한 오차도 있을 것으로 판단된다. Fig. 5에서 집수정에서 가장 멀리 떨어진 모래통의 유입율이 인접한 모래통보다 더 큰 것은 모래통의 길이가 다른 3개 보다 20cm 더 길기 때문이다.

이 방법론을 Fig. 3의 다른 잔류수두 분포곡선에도 적용하여 조도계수 n 을 구했으며, 그 결과를 다른 운전요소와

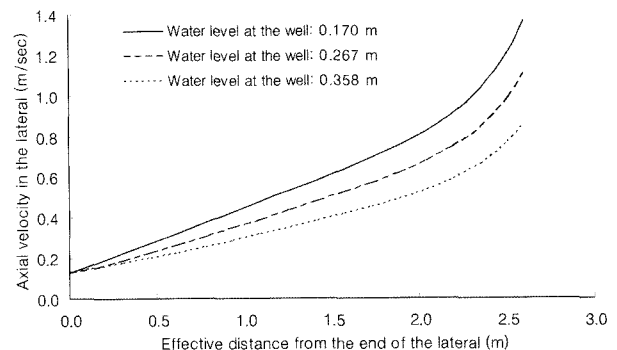


Fig. 4. Distributions of axial flow velocity in the lateral according to the water level at the well shown in Fig. 3(lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec).

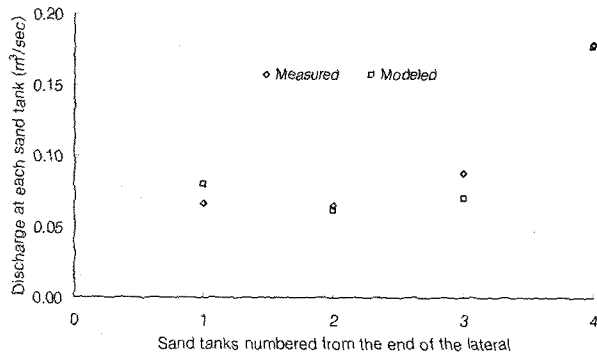


Fig. 5. Comparison of measured discharge rates with calculated ones at each section of the lateral for the case of the water level at the well of 0.17 m in Fig. 3 (section lengths: 80 cm, 60 cm, 60 cm, and 60 cm from the end of the lateral).

함께 Table 1에 나타내었다. n 값은 산출유량 즉, 집수정 유입유속이 증가함에 따라 조금씩 증가하는데 이는 여과수의 유입을 증가에 의한 저항의 증가가 축방향 흐름의 증가에 의한 진압효과보다 크기 때문이라고 볼 수 있다. Reynolds 수의 범위는 집수관의 두 끝에서의 유속, 즉 $v(0)$ 와 집수정 유입유속을 이용하여 구했으며, 물의 운동량 확산계수는 20°C에서의 값을 이용하였다.

두번째 실험의 결과에서 집수정의 수위가 약 16 cm, 26 cm, 그리고 36 cm인 경우에 대한 집수관에서의 잔류수두분포를 각각 Fig. 6, 7, 8에 나타내었다. Fig. 6~8은 모두 비슷한 경향을 나타내며, Fig. 6에 대한 설명은 안 등¹⁹⁾에 상술되어 있다. 첫번째 실험결과와 해석에서와 같이 이들 잔류수두 분포곡선을 가장 잘 묘사하는 다항식을 구하여 식 (6)에 대입하여 해석하고, 집수관 각 부위에서의 유입유량을 계산하여 실측치와 비교함으로써 n 을 구했으며, 이를 다른 운전요소와 같이 나타내면 Table 2가 된다. 이를 집수관의 길이에 따른 조도계수의 변화로 나타내면 Fig. 9가 된다. 집수정의 수위가 낮을 경우 집수관의 길이가 증가하면 조도계수가 조금씩 증가하지만 집수정의 수위가 높은 경우에는 집수관의 길이변화에 따른 조도계수의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 집수관이 일정한 길이 이상으로 길어지는 경우 산출유량 즉, 집수정 유입유속의 증가는 더 이상 발생하지 않기 때문이며, 집수정에서의 수위저하가 감소하면 이 효과가 더 커지기 때문으로 판단된다.

Table 1. Roughness coefficients along with other operational parameters of 1st-stage experiment of Ahn et al.¹⁹⁾

Water level at the well (m)	K (cm/sec)	Lateral length (m)	Lateral diameter (cm)	Entrance velocity to collector well (m/sec)	Re number (-)	n (-)
0.170	0.155	2.6	2.0	1.27	2,562-25,355	0.0147
0.267	0.155	2.6	2.0	1.02	2,846-20,503	0.0141
0.358	0.155	2.6	2.0	0.74	2,666-15,103	0.0140

K: hydraulic conductivity of the filter sand
 n : Manning's roughness coefficient

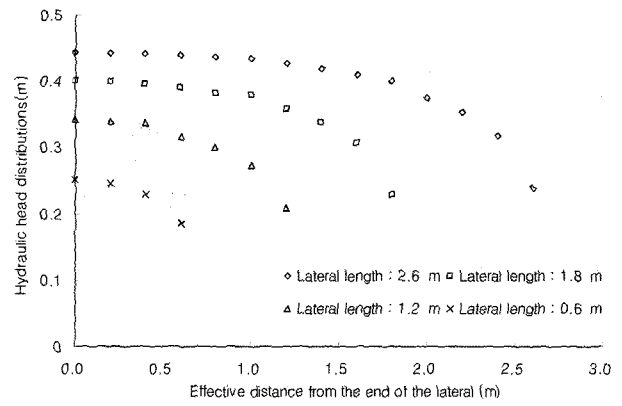


Fig. 6. Hydraulic head distributions according to the lateral length (lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.16 m, data from Ahn et al.¹⁹⁾).

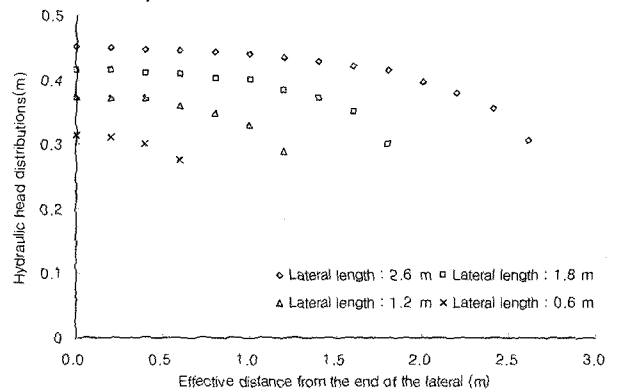


Fig. 7. Hydraulic head distributions according to the lateral length (lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.26 m, data from Ahn et al.¹⁹⁾).

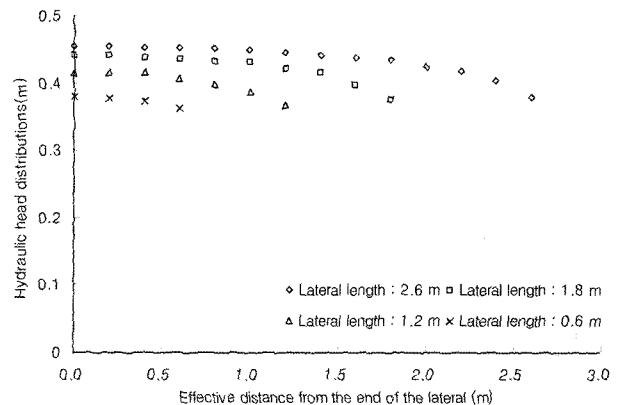


Fig. 8. Hydraulic head distributions according to the lateral length (lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.36 m, data from Ahn et al.¹⁹⁾).

세번째 실험의 결과에서 집수정의 수위가 약 16 cm, 26 cm, 36 cm인 경우에 대한 집수관에서의 잔류수두분포를 각

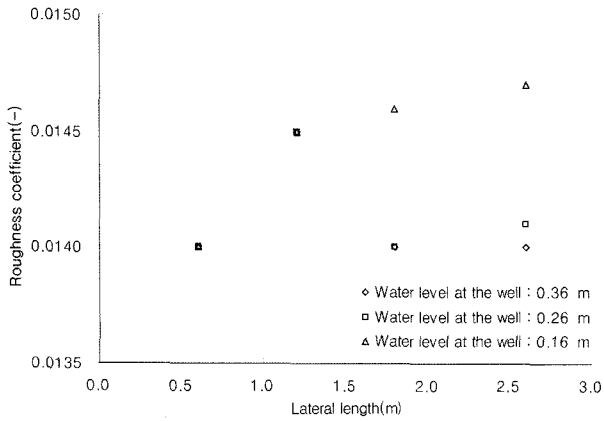


Fig. 9. Roughness coefficients according to the lateral length (lateral diameter: 2.0 cm, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.16 m, 0.26 m, and 0.36 m).

Table 2. Roughness coefficients along with other operational parameters of 2nd-stage experiment of Ahn et al.¹⁹⁾

Water level at the well (m)	K (cm/sec)	Lateral length (m)	Lateral diameter (cm)	Entrance velocity to collector well (m/sec)	Re number (-)	n (-)
0.358	0.155	2.6	2.0	0.74	2,666-15,103	0.0140
0.358	0.155	1.8	2.0	0.74	2,497-14,660	0.0140
0.353	0.155	1.2	2.0	0.64	4,342-12,783	0.0145
0.350	0.155	0.6	2.0	0.42	7,286-8,395	0.0140
0.267	0.155	2.6	2.0	1.02	2,846-20,503	0.0141
0.267	0.155	1.8	2.0	0.99	5,322-19,618	0.0140
0.263	0.155	1.2	2.0	0.91	6,402-18,183	0.0145
0.256	0.155	0.6	2.0	0.65	10,517-12,867	0.0140
0.170	0.155	2.6	2.0	1.27	2,562-25,355	0.0147
0.163	0.155	1.8	2.0	1.22	4,679-24,469	0.0146
0.162	0.155	1.2	2.0	1.13	7,309-22,402	0.0145
0.151	0.155	0.6	2.0	0.85	13,201-16,875	0.0140

각 Fig. 10~12에 나타내었다. Fig. 10~12는 모두 비슷한 경향을 나타내며, Fig. 10에 대한 설명은 안 등¹⁹⁾에 있다. 앞의 해석법을 적용하여 조도계수 n 을 구했으며, 이를 다른 운전요소과 같이 나타내면 Table 3이 된다. 이를 집수관의 직경에 따른 조도계수의 변화로 나타내면 Fig. 13이 된다. Table 3에서 Re 수가 2,300 이하인 경우는 Fig. 13에 나타내지 않았으며, 본 연구에서 사용된 Manning의 공식이 적용되지 않는 흐름영역이기 때문이다. Fig. 13에서 모래의 투수계수와 집수관의 길이가 변하지 않는 경우 집수관의 직경이 커질수록 조도계수는 감소함을 알 수 있다. 이는 직경이 커질수록 집수관의 단위표면적당 여과수 유입율은 감소하였고, 이의 측방향 흐름에 대한 저항도 이에 따라 감소하였기 때문으로 판단된다. 집수관의 단위표면적당 여과수 유입율은 집수관의 산출율을 집수관의 표면적으로 나눈 값으로 집수관 전체에 걸친 평균값이다.

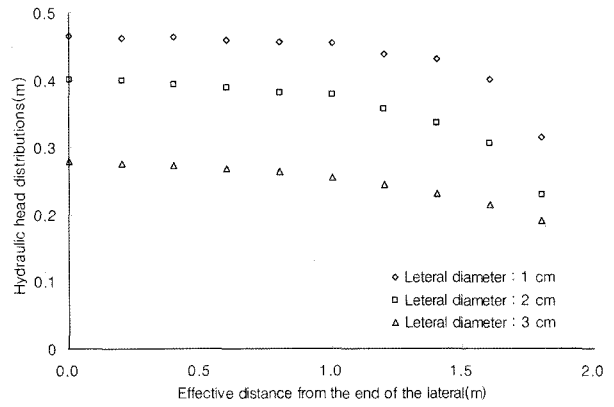


Fig. 10. Hydraulic head distributions according to the lateral diameter (hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.16 m, data from Ahn et al.¹⁹⁾).

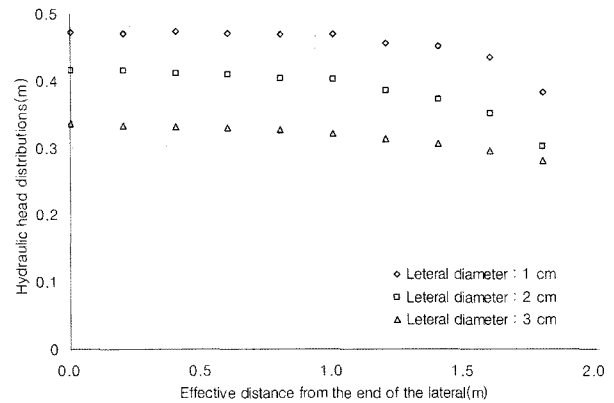


Fig. 11. Hydraulic head distributions according to the lateral diameter (hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.26 m, data from Ahn et al.¹⁹⁾).

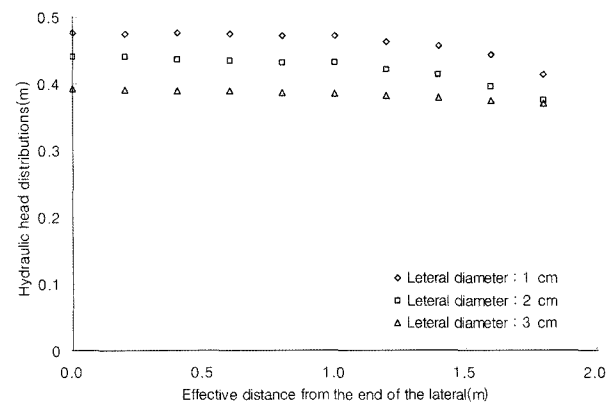


Fig. 12. Hydraulic head distributions according to the lateral diameter (hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.36 m, data from Ahn et al.¹⁹⁾).

마지막 실험의 결과는 Table 4에 나타내었다. 앞에서와 같이하여 조도계수 n 을 구했으며, 모래의 투수계수가 큰 경우에 조도계수가 더 컸으나 이는 앞의 결과와 마찬가지로 집수관에서의 측방향 유속이 증가했기 때문으로 판단된다.

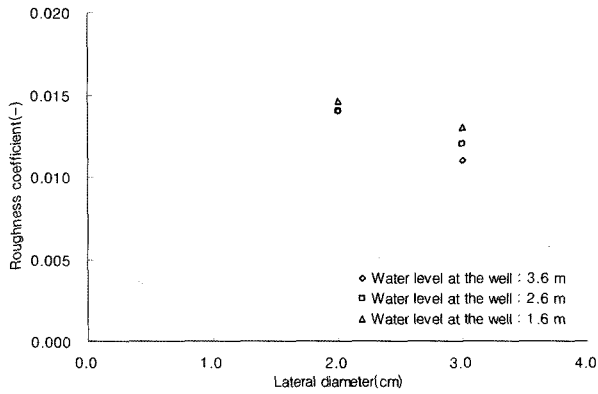


Fig. 13. Roughness coefficients according to the lateral diameter (lateral length: 1.8 m, hydraulic conductivity: 0.155 cm/sec, water level at the well: 0.16 m, 0.26 m, and 0.36 m).

Table 3. Roughness coefficients along with other operational parameters of 3rd-stage experiment of Ahn et al.¹⁹⁾

Water level at the well (m)	K (cm/sec)	Lateral length (m)	Lateral diameter (cm)	Entrance velocity to collector well (m/sec)	Re number (-)	n (-)
0.361	0.155	1.8	3.0	0.40	10,944-11,883	0.0110
0.358	0.155	1.8	2.0	0.74	2,497-14,660	0.0140
0.344	0.155	1.8	1.0	1.00	1,053-9,914	0.0120
0.270	0.155	1.8	3.0	0.61	16,521-18,296	0.0120
0.267	0.155	1.8	2.0	0.99	5,322-19,618	0.0140
0.248	0.155	1.8	1.0	1.26	1,303-12,509	0.0130
0.175	0.155	1.8	3.0	0.76	14,478-22,655	0.0130
0.163	0.155	1.8	2.0	1.22	4,679-24,469	0.0146
0.150	0.155	1.8	1.0	1.60	506-15,926	0.0147

Table 4. Roughness coefficients along with other operational parameters of 4th-stage experiment of Ahn et al.¹⁹⁾

Water level at the well (m)	K (cm/sec)	Lateral length (m)	Lateral diameter (cm)	Entrance velocity to collector well (m/sec)	Re number (-)	n (-)
0.358	0.155	1.8	2.0	0.74	2,497-14,660	0.0140
0.340	0.044	1.8	2.0	0.17	2,374-3,301	0.0090
0.267	0.155	1.8	2.0	0.99	5,322-19,618	0.0140
0.245	0.044	1.8	2.0	0.26	3,877-5,252	0.0080
0.163	0.155	1.8	2.0	1.22	4,679-24,469	0.0146
0.148	0.044	1.8	2.0	0.35	6,223-7,045	0.0080

하상여과에서 수평집수관 내부에서의 흐름에 대한 저항에 영향을 주는 요소는 집수관의 길이와 직경, 집수관 단위면적당 여과수 유입율, 모래의 투수계수 등 여러가지가 있을 수 있다. 안 등¹⁹⁾에서 집수관에서의 잔류수두분포에 관한 이들 각 요소의 영향이 집수정 유입유속으로 정리될 수 있었듯이 집수관의 저항에 대한 이들 각 요소들의 영향도 집수정 유입유속으로 망라될 수 있었다. Table 1~4에서 난류흐름인 경우의 조도계수와 집수정 유입유속의 관계를 Fig. 14에 나타

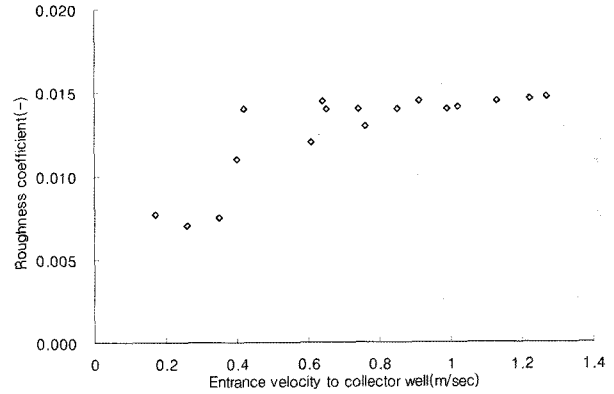


Fig. 14. Roughness coefficient according to the entrance velocity to the collector well.

내었다. 집수정 유입유속과 조도계수 사이에 상당히 큰 상관관계가 있음을 알 수 있다. 안 등¹⁹⁾에 의하면 효율적인 수평집수관은 집수정에서의 유입유속이 1 m/sec 이하이어야 한다. 한편, 하상여과의 경우 집수정 유입유속이 일정속도 이하에서는 집수정의 생산성이 낮아서 바람직하지 않으므로 적정하게 운영되는 하상여과의 경우 수평집수관의 조도계수는 0.012~0.015의 범위에서 집수정 유입유속에 따라 변화한다고 볼 수 있다. 본 연구는 하상여과과정의 모형, 특히 집수관의 직경이 3 cm 이하에 대해서 얻은 것이므로 실규모 집수정에 적용시 주의를 요한다.

4. 결론

본 연구에서 개발된 수학적 모델이 수평집수관에서의 흐름을 비교적 잘 묘사함을 알 수 있었다. 또한, 집수정 유입유속이 커짐에 따라 조도계수는 증가하지만 정상적인 하상여과의 경우에는 0.012~0.014로 거의 일정함을 알 수 있었다. 모래의 투수계수와 집수관의 길이가 일정한 경우 집수관의 직경이 커지면 조도계수는 감소함도 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원의 금수장산21 연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김승현, 정장식, 박영규, “강독여과에서 유기오염물의 이동지연효과 연구,” 대한환경공학회지, **22**(9), 1693~1705 (2000).
2. 방사형 집수정에 의한 강변여과수 개발타당성조사 및 pilot-plant 조사연구 보고서, 창원시(2003).
3. 성치돈, 안규홍, 이용훈, 공인철, 김승현, “하상여과를 이용한 하천수질개선연구-모델전개 및 모델매개변수 결정,” 대한환경공학회지, **25**(4), 486~494(2003).

4. 성치돈, 안규홍, 이용훈, 공인철, 김승현, “하상여과를 이용한 하천수질개선연구-모델해석 및 검증, 민감도분석,” 대한환경공학회지, **25**(5), 580~587(2003).
5. 김승현, 정장식, “하상여과를 이용한 금호강 수질개선연구,” 환경연구 영남대학교 환경문제연구소 논문집, **18**(2), 73~86(1999).
6. 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).
7. Hunt, H., Schubert, M. Sc., and Ray, C., “Operation and maintenance considerations,” 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. 61~70(2002a).
8. Hunt, H., Schubert, M. Sc., and Ray, C., “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. 19~27(2002b).
9. 한국수자원공사, 전국 총적층 지하수 조사 보고서, 한국수자원공사(1996).
10. 김승현, 박영규, 공종복, “이룡지구 강둑여과에서 지하수의 흐름 연구-모델 매개변수의 결정 및 자연지하수 흐름도 해석,” 대한환경공학회지, **21**(10), 1825~1836(1999).
11. 김승현, 박영규, 이철희, “강둑여과에서 최적 취수정 위치선정을 위한 모델개발,” 대한환경공학회지, **20**(1), 83~92(1998).
12. 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.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 291~302 (2002).
13. Hantush, M. S. and Papadopulus, I. S., “Flow of ground water to collector wells,” *Journal of Hydraulic Engineering Division*, **88**(5), 221~245(1962).
14. Stowe M. S., “Application of horizontal collector well technology for riverbank filtration,” *International Workshop on Riverbank/bed Filtration*, Korea Institute of Science and Technology(Green Korea 21), SUWON(2004).
15. Zhan, H. and Park, E., “Horizontal well hydraulics in leaky aquifers,” *J. Hydrology*, **281**, 129~146(2003).
16. Park, E. and Zhan, H., “Hydraulics of a finite-diameter horizontal well with wellbore storage and skin effect,” *Advances in Water Resources*, **25**, 389~400(2002).
17. Chen, C., Wan, J., and Zhan, H., “Theoretical and experimental studies of coupled seepage-pipe flow to a horizontal well,” *J. Hydrology*, **281**, 159~171(2003).
18. Mohamed, A. and Rushton, K., “Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model,” *Journal of Hydrology*, in press(2006).
19. 안규홍, 문형준, 김경수, 김승현, “하상여과 집수관 모형에서 잔류수두와 유입율 분포에 관한 실험연구,” 대한환경공학회지, **27**(12), 1305~1310(2005).
20. Olson, R. M., Wright, S. J., *Essentials of Engineering Fluid Mechanics*, 5th ed., Harper and Row Publishers, New York, USA(1990).
21. Zhan, H., Wang, L. V., and Park, E., “On the horizontal-well pumping tests in anisotropic confined aquifers,” *Journal of Hydrology*, **252**, 37~50(2001).
22. Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, 8th ed., John Wiley & Sons, New York, USA(1999).