

하상여과의 수평집수관에서 축방향 설계유속 - 모형실험결과의 실규모 적용 -

김 승 현

영남대학교 환경공학과

(2006년 6월 12일 접수, 2006년 8월 31일 채택)

Design Velocity of the Axial Flow in Collector Well Lateral in Riverbed Filtration - Extending Results of Lab-Scale Experiment to Practical Scales -

Seung-Hyun Kim

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

1. 서 론

하상여과에서 여과수는 수력경사에 따라 하상의 층적층을 통과하여 집수관으로 유입된 후 그 내부를 통해 흘러서 집수정에 유입된다. 집수관은 보통 그 길이가 수십 m에 달하며, 여과수가 집수관의 전체 길이에 걸쳐 균일하게 유입되도록 설계하는 것이 바람직하다. 하상여과와 유사한 공법인 강변여과의 경우 미국과 유럽의 설계 방식에 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 유럽의 많은 기술자들은 집수관이 긴 경우 집수정에 가까운 집수관 부위에서는 여과수가 많이 유입되지만 집수정에서 먼 부분에서는 그 유입율이 낮다고 보며,¹⁾ 미국에서는 집수관 전체에서 균등하게 여과수가 유입된다는 Hantush의 가정²⁾을 많이 적용하고 있다.³⁾ 하상여과의 경험이 부족한 우리나라에서 최적의 하상여과정을 건설하기 위해서는 이들 두 의견에 대한 정확한 이해와 평가가 필요하다고 할 것이다. 이를 위해 안 등⁴⁾은 집수관 모형을 이용한 실험연구를 수행했으며, 하상여과에서 하천수가 대수층을 통과할 때 발생하는 저항과 여과수가 집수관 내부에서 축 방향으로 흐를 때 발생하는 저항 사이의 균형에 의해 집수관 각 부위에서의 여과수 유입율이 달라진다고 보고하였다. 즉, 대수층에서의 저항이 집수관에서의 저항에 비해 큰 경우에는 여과수 유입율이 집수관 전체 길이에 걸쳐 거의 균등하게 되며, 그 반대의 경우에는 집수정에 가까울수록 집수관에서의 여과수 유입율이 증가한다고 하였다. 이로부터 투수계수가 큰 유럽의 경우⁵⁾ 대수층에서의 저항이 작으므로 집수정 부근의 유입율이 커지게 되고, 미국의 경우에는 투수계수가 유럽에 비해 작아서 Hantush²⁾의 가정이 보다 타당하

게 됨을 알 수 있다.

대수층에서의 저항과 집수관에서의 저항 사이의 균형을 알 수 있는 기준으로 안 등⁴⁾은 집수관에서 집수정으로 유입하는 유속을 들고 있으며, 이 값이 1 m/sec 이하인 경우에는 집수관에서의 저항이 크지 않아 여과수 유입이 집수관 전체 길이에 걸쳐 비교적 균일하게 일어난다고 하였다. 그러나, 그들의 결론은 하상여과의 집수관의 축소형을 이용한 실내실험으로부터 얻은 것이어서 이의 실규모 설비에 대한 적용은 그 타당성이 검증되어야 할 것이다.

본 연구에서는 하상여과의 설계시 효율적인 집수관의 기준으로 안 등⁴⁾이 소규모의 실내실험에 근거하여 제시한 집수정의 유입유속 1 m/sec가 실규모의 집수관 설계에도 적용될 수 있는지 그 타당성을 이론적으로 검토한다.

2. 안 등⁴⁾의 실험 요약

안 등⁴⁾은 하상여과의 모형으로 폭 0.2 m, 높이 0.5 m, 그리고 길이가 0.6 m인 모래통 3개와 길이만 0.8 m로 다른 1개의 모래통을 실험장치로 사용하였다. 연결된 모래통의 끝에는 집수정도 설치하였다. 집수관의 직경은 1 cm, 2 cm, 3 cm의 세 종류를 사용하였고, 모래는 두 종류를 사용하였으며 그 투수계수는 0.155 cm/sec와 0.044 cm/sec이었다. 집수정에서의 수위는 3가지로 조절할 수 있도록 하였다. 실험에서는 모래통의 수위를 일정하게 유지하면서 집수정의 수위, 집수관의 길이와 직경, 그리고 모래의 투수계수를 변화시키면서 각 모래통에 유입되는 유량과 집수정에서 산출되는 유량, 그리고 집수관 표면의 수두를 일정 간격으로 측정하였다. 이들이 사용한 실험장치의 개요도는 Fig. 1에 나타내었고 실험에 관한 자세한 사항은 안 등⁴⁾에 서술되어 있다.

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

Fax: 053-810-4624

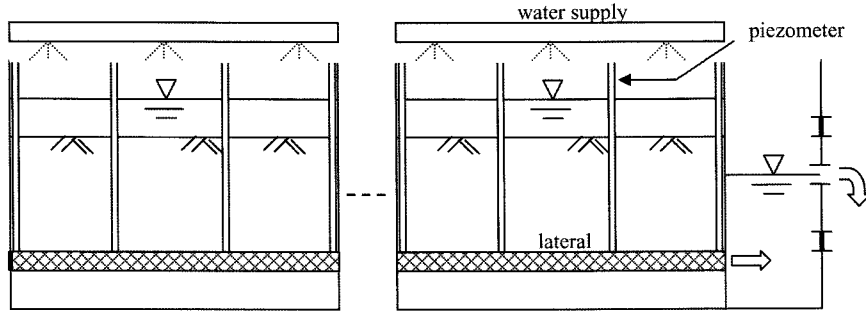


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus employed in Ahn et al.(2005).

3. 고찰

안 등⁴⁾의 연구결과 집수관에서의 축 방향 유속은 집수정의 수위, 모래의 투수계수와 집수관의 길이 및 직경에 따라 변화하며, 축 방향 유속이 커지면 집수정에서의 수위저하가 집수관 전체에 효과적으로 전달되지 않아서 집수정으로부터의 거리가 증가함에 따라 집수관 표면에서의 수두가 증가한다고 하였다. 집수관에서의 수두가 증가하면 하천수위와 집수관에서의 수두와의 차이가 감소하여 하상여과에서 물 흐름의 구동력인 수력경사도 감소하므로 집수관으로의 여과수 유입이 감소하게 된다. 집수정에서의 수위저하가 집수관 전체에 전달되지 못하는 이유는 집수관 내부의 축 방향 물 흐름에 의해 발생하는 저항, 특히 집수관 벽에서의 마찰저항 때문이다.

집수관 내부의 흐름에서 벽에 의한 마찰은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 집수관 스크린 자체의 저항으로 집수관의 재질과 스크린의 개공율, 그리고 개공형태 등에 의해 결정된다. 둘째는 스크린을 통해서 여과수가 집수관으로 유입될 때 집수관에 수직으로 유입됨으로써 축방향 흐름에 저항으로 작용하는 것이며, 이는 집수관의 직경과 여과수 유입율, 그리고 축 방향 유속에 따라 달라진다. 한편, Kim과 Ahn⁶⁾은 집수관에서 유입율 분포를 예측하는 수학적 모델을 수립하여 안 등⁴⁾의 실험결과를 해석하고, 집수관에서의 축방향 흐름에 작용하는 저항을 하나로 보아 여러가지의 길이와 직경의 집수관, 그리고 모래의 투수계수에 대해서 Manning의 조도계수를 구했으며, 이는 Table 1에 정리되어 있다. Table 1에서 집수관의 재질과 눈금의 형상 그리고 개공율이 같더라도 집수관의 길이가 길수록, 그리고 직경이 작을수록 조도계수가 증가하며 모래의 투수계수가 작은 경우에는 조도계수도 작음을 알 수 있다. 안 등⁴⁾의 연구에서 집수관으로의 여과수 유입을 분포형태는 다른 여러 요인의 영향이 있음에도 불구하고 집수정으로의 유입유속에 따라 결정되었듯이 이들 각 요인들의 조도계수에 대한 개별적인 영향도 집수정으로의 유입유속으로 망라될 수 있었으며 Fig. 2에 그 관계를 도시하였다. 집수정으로의 유입유속이 증가함에 따라 조도계수가 조금씩 증가하며, 실제의 수평집수관 운영시 예상되는 유입유속에서는 조도계수가 0.013~0.015 범위인 것을 알 수 있다. 또한, 이 범위에서는 축방향 유속이 크게 변해도, 다시 말하면 집수관으로의 여과수 유입율이 크게 변해도 조도계수는 거의 일정함을 알 수 있다.

Table 1. Manning's roughness coefficients of various lateral lengths and diameters installed in the filter sand of various permeabilities(data from Ahn et al, 2005)

Lateral length (m)	Hydraulic conductivity (cm/sec)	Lateral diameter (cm)	Entrance velocity to collector well (m/sec)	Roughness coefficient (-)
2.6	0.155	2	0.74	0.0140
2.6	0.155	2	1.02	0.0141
2.6	0.155	2	1.27	0.0147
1.8	0.044	2	0.35	0.0100
1.8	0.155	3	0.76	0.0130
1.8	0.155	2	1.22	0.0146
1.8	0.155	1	1.60	0.0147
1.2	0.155	2	1.12	0.0145
0.6	0.155	2	0.85	0.0140

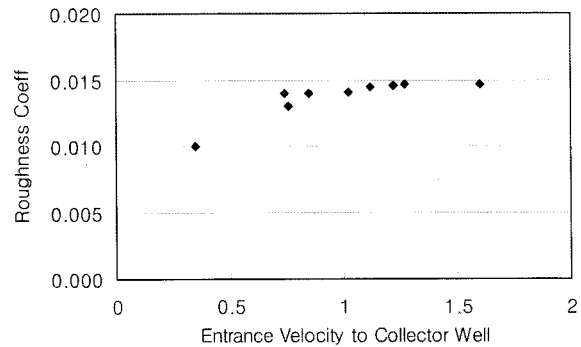


Fig. 2. Manning's roughness coefficients according to the entrance velocity to the collector well(data from Kim and Ahn, 2006).

안 등⁴⁾이 모형실험을 통해 제시한 효율적인 집수관 설계 기준인 1 m/sec의 집수정 유입유속이 발생한 경우 집수관 양끝에서의 수두차이는 최대 11 cm이었으며, 이때의 집수관 길이는 1.8 m, 직경은 2 cm이었다. 집수정으로의 유입유속이 1 m/sec인 경우 실규모 집수관에서도 여과수의 집수관 유입율이 집수관 전체에 걸쳐 균일하다고 가정하고, 모형 집수관에서의 관측결과를 이용하여 실규모에서 집수관의 양 끝의 수두차를 구하며, 이 값이 모형에 비해 크지 않으면 가정치 1 m/sec가 실규모에서도 효율적인 수평집수관의 설계기준이라고 볼 수 있다.

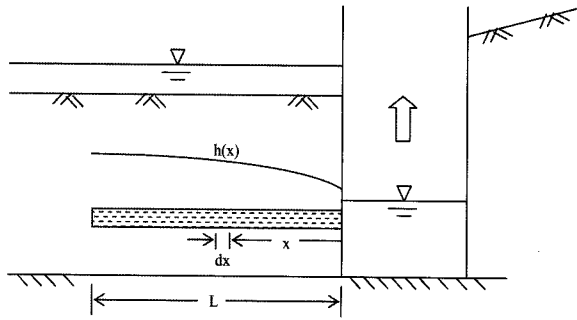


Fig. 3. Coordinate system to investigate the head distribution on a lateral in practical-scale riverbed filtration.

집수관에서의 수두분포를 파악하기 위해서 Fig. 3과 같은 좌표계를 취한다. Fig. 3에서 $h(x)$ 는 집수관 바깥면에서의 수두분포를 나타내며, $h(0)$ 는 집수정에 인접한 집수관 표면의 수두값이다. 주어진 $h(0)$ 값으로부터 $h(x)$ 의 분포를 구하기 위해 Darcy-Weisbach 손실수두공식을 사용하며, Fig. 3에서 미세길이 Δx 에 대해 이 공식을 적용하여 Δx 양 끝의 $h(x)$ 의 차이를 구하면

$$\Delta h = f \frac{\Delta x v^2}{D 2g} \tag{1}$$

이 된다.⁷⁾ 여기서 f 는 마찰손실계수(-), D 는 집수관의 직경(m), v 는 집수관에서의 축 방향 유속(m/sec), 그리고 g 는 중력가속도(m/sec²)를 나타낸다. 집수관 내부의 축방향 흐름을 난류로 보아 Manning의 공식을 사용하면 마찰손실계수 f 는

$$f = \frac{124.5n^2}{D^{1/3}} \tag{2}$$

로 나타낼 수 있고, n 은 Manning의 조도계수이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 $\Delta x \rightarrow 0$ 으로 하면

$$\frac{dh}{dx} = \frac{124.5n^2 v^2}{D^{4/3} 2g} \tag{3}$$

을 얻는다. 이 식은 집수관 표면의 수두분포에 대한 1계 미분방정식으로 여러 방법으로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 Euler의 수치해법의 원리를 적용하여⁸⁾ 집수정으로부터의 유입유속이 1 m/sec로 고정되고 집수관이 실규모로 확대될 때의 수두분포를 고찰한다.

안 등⁴⁾에 의하면 집수정으로부터의 유입유속이 작은 경우 여과수 유입율은 집수관 전체 길이에 걸쳐서 거의 같다. 이 경우 집수관 내부에서의 축 방향 흐름유속은 집수관 끝의 0에서 집수정에 접근할수록 선형으로 증가하여 집수정에 유입할 때 최대값이 된다. 속도수두는 속도의 제곱에 비례하므로 집수정에 접근함에 따라 점차 크게 증가하는 포물선 형태를 가진다. 이러한 현상은 실규모 집수관이나 모형 집수관

에서 공통적으로 발생하는 현상으로, 집수관에서의 최대유속 즉, 집수정으로부터의 유입유속이 예를 들어 1 m/sec로 같은 경우 축 방향 유속은 모형 집수관에서는 짧은 거리에 걸쳐서 0~1 m/sec로 선형으로 분포하는 반면 실규모 집수관에서는 긴 거리에 걸쳐서 선형으로 분포하게 된다. 두 경우 모두 집수관 전체 길이를 같은 수(예를 들어 100개)의 구간으로 등분하면 각 절점 사이의 거리는 실규모 집수관에서 더 크지만, 모형과 실규모 집수관에서의 상대적 위치가 같은 두 절점에서 축방향 유속은 같은 값이 된다. 이는 속도수두의 분포에도 그대로 적용된다. 한편, Table 1에서 알 수 있듯이 조도계수는 집수관의 직경과 길이에 따라 큰 차이가 없으므로 모형과 실규모의 집수관에 같은 값을 사용한다.

$h(0)$ 가 주어져서 식 (3)을 Euler의 방법으로 해석하여 수두분포 $h(x)$ 를 구하는 것은

$$\Delta h = \frac{124.5n^2 v^2}{D^{4/3} 2g} \Delta x \tag{4}$$

를 집수정에 인접한 집수관 부위로부터 집수관의 끝까지 각 절점에 차례로 적용하는 과정이다. 그런데 모형과 실규모의 두 집수관에서 각각 같은 상대적 위치에 있는 절점에서는 속도수두 값이 같고 조도계수 값도 같다고 볼 수 있으므로 인접한 두 절점 사이의 수두 차이 Δh 는 집수관의 직경 D 와 절점 사이의 거리 Δx 에 따라 달라진다. 실규모의 집수관은 보통 직경이 30 cm, 길이는 50 m 또는 그 이상인 것도 있으므로⁹⁾ 안 등⁴⁾의 모형 집수관에 비해 그 직경이 15배, 그리고 길이가 30배로 크다고 볼 수 있다. 집수정 유입유속으로 두 집수관에 같은 값(1 m/sec)을 적용하면 실규모의 집수관 각 절점 사이의 수두 차이 Δh 는 모형 집수관에서의 Δh 의 $\frac{30}{15^{4/3}} = 0.81$ 배가 된다. 따라서 모형 집수관 양끝에서의 수두 차이가 11 cm인 경우 실규모 집수관에서는 이 값이 9 cm로 모형 집수관에 비해 오히려 작은 값이 된다. 본 연구에서 도입한 가정에 의한 오차를 감안하더라도 모형 집수관 실험에서 얻은 집수정으로부터의 적정 최대유입유속 1 m/sec는 큰 오차 없이 실규모의 집수관에도 그대로 적용이 가능한 것을 알 수 있다. 다만, 본 연구에서는 모형 집수관에서 얻은 조도계수 값의 경향을 실규모까지 외삽하였으므로 이에 의한 오차가 있을 수 있고, 집수관 내부의 축방향 흐름을 완전히 발달한 난류로 보아 Manning의 공식으로 묘사하였으나 실제로는 완전히 발달하지 않은 난류와 일부 층류도 있을 수 있으므로 이에 의한 오차도 있을 수 있어 본 연구의 결과를 실제에 적용할 때 주의가 요청된다.

4. 요약 및 결론

하상여과를 위한 집수관의 설계에서 집수정으로부터의 최대 유입유속 값으로 1 m/sec를 제시한 안 등⁴⁾의 모형실험 결과를 실규모의 집수관에 적용할 수 있는지 고찰하였다. Darcy-

Weisbach 손실수두 공식을 이용하여 집수관에서의 수두분포를 묘사하는 미분방정식을 유도하였고, 이를 해석하기 위해 Euler의 수치해법 원리를 적용하였다. 해석결과 모형 집수관에서 얻은 기준을 실규모의 설계에도 큰 오차없이 적용할 수 있음을 알 수 있었다.

사 사

본 연구는 한국과학기술연구원의 금수강산21 연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Gyula, C., Vice-President, Schki-bau KFT, Budapest, Hungary, personal correspondence(2004).
2. Hantush, M. S., *Hydraulics of Wells*, Advances in Hydroscience, vol. 4, Academic Press Inc., New York, pp. 281~431(1964).
3. 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), COEX(2004).
4. 안규홍, 문형준, 김경수, 김승현, "하상여과 집수관 모형에서 잔류수두와 유입을 분포에 관한 실험연구," 대한환경공학회지, **27**(12), 1305~1310(2005).
5. Laszlo, F., "Experience with riverbank filtration(RBF) in Europe," International Workshop on Riverbank/bed Filtration, Korea Institute of Science and Technology(Green Korea 21), COEX(2004).
6. Kim, S.-H. and Ahn, K.-H., "Distribution of discharge intensity along collector well laterals in a model riverbed filtration," submitted to *Transport in Porous Media* (2006).
7. 안수환, 수리학, 동명사, 서울(2000).
8. Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, 8th ed., John Wiley & Sons, New York(1999).
9. Hunt, H., Schubert, J., 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(2002).