

## 다목적 여과저류지에서의 하상여과용 인공하천 설계연구

# A Study on the Design of Artificial Stream for Riverbed Filtration in Multi-purpose Filtration Pond

손동훈 · 박재영\* · 김승현<sup>†</sup>

Dong-Hoon Sohn · Jae-Young Park\* · Seung-Hyun Kim<sup>†</sup>

영남대학교 환경공학과 · \*한국수자원공사 조사기획처

Department of Environmental Engineering, Yeungnam University

\*Water Resources Investigation & Planning Department, Korea Water Resources Corporation

(2011년 4월 28일 접수, 2011년 7월 26일 채택)

**Abstract :** In order to find the best design of artificial stream for the riverbed filtration in multi-purpose filtration pond, a mathematical model was developed employing the energy line and the Manning's formula and was analyzed by the Euler's technique. Various design factors were investigated through scenario analyses of the artificial stream using the model. Results showed that the appropriate slope of the stream bottom was 2/10,000 and the appropriate infiltration rate at the streambed was 2.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day for the pond with the area of 100 ha, and that the Manning's roughness coefficient in this case was expected to be about 0.026 and the maximum water-depth was less than 1m. It was also shown that the longer the artificial stream the more advantageous it became for the riverbed filtration. Furthermore, results showed that it was not an efficient way to prevent clogging of the streambed by increasing the flow velocity of the stream and that the performance was higher near a weir with a large head drop.

**Key Words :** Multi-purpose Filtration Pond, Artificial Stream, Mathematical Model, Riverbed Filtration, Optimum Design

**요약 :** 다목적 여과저류지에 하상여과를 적용하기 위한 인공하천의 최적설계를 찾기 위해서 하천수의 에너지경사와 Manning의 평균유속공식을 이용하여 물 흐름에 대한 수학적 모델을 수립하였고, Euler의 방법을 이용한 수치해법으로 해석하였다. 모델을 이용하여 다양한 시나리오에 대한 모사를 수행함으로써 하상여과용 인공하천의 여러 설계요소를 검토하였다. 검토결과 면적이 100 ha인 강변저류지의 경우, 인공하천의 종단경사는 2/10,000, 하상에서의 침투율은 2.5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day가 적당한 것을 알 수 있었다. 이 경우 수심은 1 m 이내이고 하상에서의 Manning의 조도계수는 0.026 정도로 예측되었으며, 인공하천의 길이가 길수록 유리함을 알 수 있었다. 한편, 인공하천에 빠른 유속을 발생시킴으로써 하상여과에 수반하는 하상의 폐색을 방지하는 방법은 효율적이지 않음을 알 수 있었고, 낙차가 큰 보의 주변에서 본 설비의 효율이 더 좋아짐을 알 수 있었다.

**주제어 :** 다목적 여과저류지, 인공하천, 수학적 모델, 하상여과, 최적설계

## 1. 서론

강변저류지는 하천변 제내지에 설치되는 일시적인 범람을 위한 설비로, 하류부의 침투홍수량을 저감하며 홍수파의 이동을 지체하는 역할을 한다. 우리나라 하천은 하상계수가 커서 저류지와 같은 홍수예방을 위한 설비가 필요하지만 아직 우리나라에서 강변저류지가 설치된 예는 없는 실정이다. 이와 달리 일본에서는 와타라세 유수지 등 몇 개소에서 강변저류지가 운영되고 있으며 미국에서도 텍사스주 해리스 카운티에 저류지가 설치되어 있고, 이들 저류지는 비상시의 홍수예방뿐만 아니라 평상시에는 관개용수 공급이나 생태습지 또는 운동장 등으로 활용되고 있다.<sup>1)</sup>

최근 우리나라에서도 저류지의 필요성이 논의되고 있다. 하천별 유역종합치수계획상에는 30여개소의 강변저류지가 계획된 바 있고,<sup>1)</sup> 4대강 살리기 마스터플랜<sup>2)</sup>에는 방수로, 지하하천 등과 함께 다양한 치수대책의 일환으로 강변저류지 그리고 이와 유사한 개념인 홍수조절지 등이 계획되고 있다. 4대강 살리기 마스터플랜에서 계획중인 이들 설비는 5~6

개소이지만 필요시 이러한 기능으로 전환이 가능한 생태습지까지 포함하면 40여개소에 이른다. 이러한 설비의 평상시 용도는 외국에서와 같이 생태습지공원이나 운동장 또는 재생에너지단지 등으로 활용할 계획이다.<sup>2)</sup>

낙동강과 같이 하천수가 상수원으로 사용되는 경우 상류에서 오염사고가 발생하면 하류에서는 피해를 받게 된다. 1991년 발생한 낙동강의 페놀오염사고에서 오염원이 대구시 구간을 통과하는데 소요된 시간은 6일이었고,<sup>3)</sup> 이 기간 동안에는 오염의 영향을 받지 않은 대체 수원이 필요하다. 만약 상류에서 오염사고 발생시 오염원이 도달하기 전에 하천수를 강변저류지에 저장하여 오염원이 통과하는 동안 상수원으로 공급한다면 이에 대한 해법이 될 수 있을 것이다. 한편, 우리나라 하천은 갈수기가 길고 이 기간 동안에는 하천수의 오염도가 심해져서 수질에 대한 불안감이 클 뿐 아니라 수처리비용도 증가하여 좋은 상수원이라 하기는 어렵다. 따라서 오염사고가 없는 평상시의 갈수기에도 양질의 상수원수를 얻을 수 있는 방안이 필요하며, 강변저류지를 활용하여 간접취수를 도입한다면 그 해법이 될 수 있을 것

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

이다.

현재의 우리나라 하천조건에서도 강변여과나 하상여과 등 간접취수 방식을 도입하는 경우 양질의 상수원수를 얻을 수 있다.<sup>4)</sup> 그러나 4대강 살리기 사업으로 하천에 보가 설치되어 유속이 감소하면 세립질이 침전하여 하상의 투수계수가 감소하게 된다. 이로 인해 하천수가 대수층으로 함양되는 속도가 느려져서 강변여과뿐 아니라 산출유량이 큰 것으로 알려진 하상여과도 상당한 정도의 효율감소가 예상된다. 따라서 이러한 변화된 여건에 적합한 새로운 형태의 상수원수 취수법의 개발이 필요한 실정이다. 다행히 유역 종합취수계획과 4대강 살리기 마스터플랜에 강변저류지와 홍수조절지가 포함되어 있고, 이를 활용하면 양질의 상수원수를 다량으로 얻을 수 있는 다목적 여과저류지를 조성하여 간접취수방식을 적용할 수 있으므로 이에 대한 기술개발이 필요하다 할 것이다.

세계적으로 홍수조절용 저류지를 활용하여 양질의 상수원수를 얻는 다목적 여과저류지를 개발한 예는 아직 보고된 바 없다. 그러나 기존의 외국기술 중에서 유사한 특성을 가진 토양대수층처리(Soil Aquifer Treatment)를 여기에 적용할 수는 있을 것이다. 이 기술은 미국의 서부 건조지역이나 이스라엘 등에서 많이 사용되고 있으며, 인공함양지를 만들어 상당한 수심으로 물을 가둔 후 토양을 통과하면서 정화된 여과수를 인공함양지 주변의 수직정을 통해 회수하는 시스템이다.<sup>5-8)</sup> 이 방식에서는 저류지내에 물 흐름이 없어서 장시간 운영하면 저류지 바닥에 오염물이 집적되어 폐색이 심해지기 때문에 이를 방지하기 위해 주기적으로 저류지를 비교적 장시간 건조시켜야 한다. 따라서 저류지의 개수가 실제로 운영되는 개수보다 더 많아야 하므로 경제성이 떨어지게 된다.<sup>6,9)</sup> 또한, 이 방식은 저류지에서 원수를 수일~수주의 비교적 긴 시간 동안 체류시키기 때문에 대기중의 산소가 토양으로 침투하지 못하여 토양환경이 호기상태로 유지될 수 없고 따라서 오염제거율이 높지 않게 된다.<sup>10)</sup> 이에 더하여 영양염이 함유된 하천수를 장시간 체류시킴으로 인해 조류가 발생하기 쉽고 이의 침전으로 바닥의 폐색이 더욱 심해지며, 조류발생에 수반하는 높은 pH로 인해 바닥의 시멘트화가 발생하여 침투속도가 더욱 느려지게 되는 단점도 있다.<sup>9)</sup>

다목적 여과저류지에 적용할 수 있는 다른 간접취수법으로는 하상여과를 고려할 수 있다. 하상여과는 최근에 개발되었지만 이에 대해 상당한 연구결과가 보고되었고,<sup>4,11-20)</sup> 울산광역시 태화강 등에 실규모로 설치되어 성공적으로 운영되고 있어서 이의 효능은 충분히 검증되었다고 할 수 있다. 그러나 다목적 여과저류지에 하상여과를 적용하기 위해서는 저류지에 인공하천을 조성하여 상당한 유속을 유지할 수 있어야 한다. 표면폐색을 방지하고 여과토양층에 산소를 공급하기 위해서이다. 저류지에 인공하천을 만들기 위해서는 격벽(baffle)을 설치하면 되고 그 예를 Fig. 1에 나타내었다.

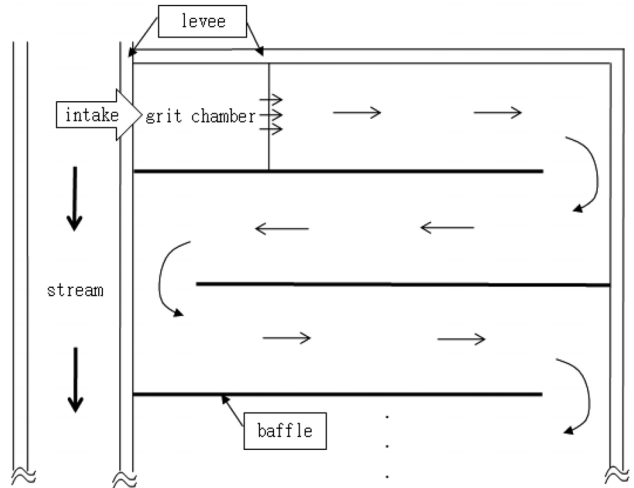


Fig. 1. An example of baffle deployment to form artificial stream in multi-purpose filtration pond.

하상여과에서는 하상의 폐색이 수반되며 적당한 폐색은 수질개선을 위해 필요하지만 과도한 폐색은 여과수의 유량 산출에 피해를 준다. 따라서 표면폐색을 적절한 수준으로 억제하여야 하고, 이를 위해서는 하천의 유속이 상당한 정도로 커야 한다.<sup>21)</sup> 따라서 인공하천에서 여과수의 목표산출유량이 주어지면 최소의 하천유량으로 하상여과에 적당한 하천유속을 가지도록 하천의 종단경사가 충분히 급해야 한다. 그러나 종단경사가 급할수록 비상시 저류용량이 감소하므로 이를 고려하여 적당한 종단경사가 결정되어야 한다. 한편, 자연하천의 경우 하천수의 흐름에 수반하여 토립자도 이송되므로 침식과 퇴적이 동시에 발생하여 그 평형을 유지한다. 침식되는 양만큼 상류로부터 이송되어 온 토사가 퇴적하기 때문이다.<sup>22)</sup> 그러나 인공하천에서는 외부로부터의 자연적인 토사유입을 기대할 수 없으므로 하상여과의 성공적인 운영을 위해서는 하상에 적절한 장갑층을 형성하여 토사의 이송이 발생하지 않도록 하는 것이 유리하며, 장갑층의 설계를 위해서는 인공하천에서의 유속분포를 파악하여야 한다.

본 연구에서는 수학적 모델링과 수치해법을 이용하여 다목적 여과저류지에 격벽을 설치하여 형성된 인공하천의 적당한 종단경사를 결정하고 이 하천의 종거에 따른 수위와 유속분포 등을 파악함으로써 인공하천에서의 하상여과 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 모델전개

다목적 여과저류지에 형성된 인공하천에서 하천수는 Fig. 1의 격벽 사이를 흐르므로 2차원 흐름에 가깝다. 강변저류지 1개소의 면적은 약 100 ha에 이르므로<sup>1)</sup> 이를 1 km × 1 km로 보고 격벽의 간격을 100 m로 하면 인공하천의 전체 길이는 약 10 km에 이르고 1 km마다 방향을 반대로 바꾸는 길고 복잡한 형상이 된다. 그러나 하천폭이 일정하고 하

상의 중단경사도 일정하며 인공하천의 대부분은 직선흐름이므로 해석의 편의를 위해 1차원흐름으로 가정하였다. 인공하천에서의 하상여과는 격벽의 중간에 격벽과 평행하게 하상의 적당한 깊이에 도수관을 설치하고, 이 도수관에 직각으로 연결된 다수의 수평집수관을 양쪽 방향으로 일정한 간격으로 설치할 수 있다. 수평집수관 내부에서 축방향 흐름에 대한 저항이 감소될 수 있는 수평집수관의 적정 최대 길이는 50 m 정도이므로 격벽의 간격은 100 m 이하로 보았다.<sup>19,20)</sup> 하류로 갈수록 하천유량과 수심이 점차 감소하는 인공하천에서의 흐름을 해석하기 위해서 Fig. 2의 임의의 지점  $x$ 에서 물이 가지는 전체 에너지수두  $E(x)(m)$ 를

$$E(x) = \frac{v(x)^2}{2g} + h(x) \cos \theta + z_0 - x \tan \theta \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다.<sup>23)</sup> 여기서  $v(x)$ 는 하천유속(m/sec),  $h(x)$ 는 수심(m),  $\theta$ 는 하상이 수평면과 이루는 각도(-),  $z_0$ 는 인공하천 최상류의 하상의 고도(m)를 나타낸다. 본 연구에서  $\theta$ 는 작으므로  $\cos \theta \cong 1$ 로 보고, 하상의 기울기  $\tan \theta$ 는  $S_0$ 로 나타낸 후 이 식을  $x$ 로 미분하면 에너지경사

$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{v(x)}{g} \frac{dv(x)}{dx} + \frac{dh(x)}{dx} - S_0 \quad (2)$$

를 얻는다.<sup>24)</sup>

한편, Fig. 2에서 미세구간  $\Delta x$ 에서의 물 수치로부터

$$\frac{dQ(x)}{dx} = -q \quad (3)$$

을 얻으며, 여기서  $Q(x)$ 는 단위폭당 하천유량( $m^3/sec$ ), 그리고  $q$ 는 하상여과에 의해 하상으로 스며드는 침투율( $m^3/m^2 \cdot sec$ )을 나타낸다. 인공하천에 하상여과를 적용하는 방법은 하천바닥의 일정한 깊이에 다수의 수평집수관을 일정한 간격으로 설치하며, 수평집수관의 설치 깊이와 간격, 직경, 길이, 개공율 등은 원수의 수질과 여과수의 목표수질, 목표 산출유량, 하상토양의 투수계수 등 여러 요소들에 의해 결정되고, 여과수가 하상전체에서 비교적 균등하게 침투되도록 하는 설계가 바람직하며, 낙동강의 지류인 금호강에 하상여과를 적용하기 위한 목적으로 이러한 설계가 제시된 바 있다.<sup>25)</sup> 따라서 본 연구에서  $q$ 는 상수로 본다.

단위폭당 하천유량은 수심과 하천유속의 곱이므로 식 (3)을 고려하면

$$\frac{dv(x)}{dx} = \frac{1}{h(x)} \left( -q - v(x) \frac{dh(x)}{dx} \right) \quad (4)$$

을 얻을 수 있고, 이를 식 (2)에 대입하여 정리하면

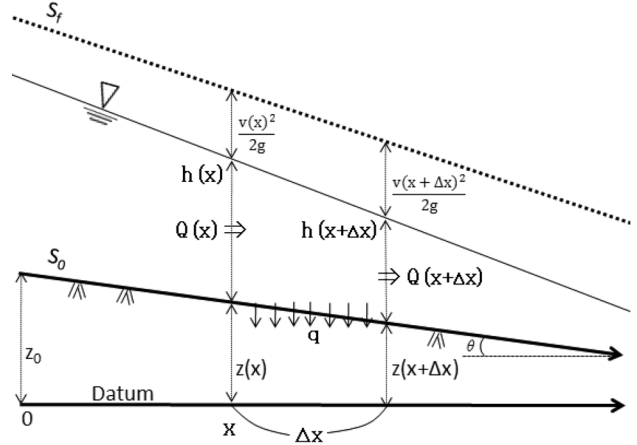


Fig. 2. Schematization of flow with gradually decreasing discharge in the artificial stream of a multi-purpose filtration pond.

$$\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{q Q(x)}{g h(x)^2} - \frac{1}{g} \frac{Q(x)^2}{h(x)^3} \frac{dh(x)}{dx} + \frac{dh(x)}{dx} - S_0 \quad (5)$$

을 얻는다.

하상여과용 인공하천에서는 하천흐름에 따라 하천유량과 수심이 점차로 감소하며, 이 경우에도 어떤 단면에서 하천수의 에너지선의 경사는 하천유량과 수심의 변화와 상관없이 그 단면에서의 하천유량과 수심 값들을 이용한 Manning의 평균유속공식으로 주어진다 가정하여 에너지경사

$$\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{n^2 Q(x)^2}{h(x)^{10/3}} \quad (6)$$

을 얻는다.<sup>26)</sup> 여기서  $n$ 은 Manning의 조도계수(-)를 나타낸다. 본 연구에서는 전체 영역(domain)에서의 하천유속이 난류영역(regime)에 해당되기 때문에 Manning의 평균유속공식을 사용하였으며, 강변저류지에 형성되는 인공하천은 폭이 약 100 m에 이르는 반면 그 수심은 1~2 m에 정도에 불과하므로 수리평균심이 수심과 같다고 보았다.<sup>26)</sup> 식 (5)와 식 (6)을 등치시켜 정리하면

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{S_0 + \frac{qQ(x)}{gh(x)^2} - \frac{n^2 Q(x)^2}{h(x)^{10/3}}}{1 - \frac{Q(x)^2}{gh(x)^3}} \quad (7)$$

이 된다. 이 식은  $h(x)$ 에 관한 1계 미분방정식으로 적절한 경계조건을 적용하여 해석할 수 있다.

### 3. 모델해석

식 (7)을 해석하기 위해서는 먼저  $Q(x)$ 를 알아야 하며, 이

는 식 (3)을 해석하여 얻는다. 식 (3)의 해석은 Euler의 방법에 의한다.<sup>27)</sup> 하류로 갈수록 유량  $Q(x)$ 가 감소하고 이에 따라 유속도 감소하여 하상의 폐색이 우려되므로 식 (3)의 해석시 하천의 최하류에서도 일정한 정도의 잔류유량  $Q_{out}$  ( $m^3/sec$ )이 흐르도록 하여 하류에서의 하상폐색을 방지하도록 한다.

식 (3)과  $q$  및  $Q_{out}$ 을 이용하여 인공하천 각 부분에서의 유량  $Q(x)$ 를 구한 후 그 결과를 식 (7)에 대입하면 이 식은  $h(x)$ 에 관한 1계 미분방정식이 된다. 이 식의 해석에도 Euler의 방법을 적용하며, 본 연구에서의 흐름은 하상의 세굴을 방지하기 위하여 상류흐름으로 제한되기 때문에 최하류측의 수심을 먼저 가정하고 이로부터 인접한 절점에서의 수심들을 상류방향으로 전체영역에 대해서 순서대로 구한다.<sup>26)</sup> 최하류 수심은 잔류유량과 하상의 종단경사 등 여러 요소들에 의해 결정되며, 시행착오에 의해 적절한 값을 결정하였다.

지배방정식인 식 (7)은 비선형 미분방정식이어서 해석해가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서 적용한 해법의 타당성을 검증하기 위하여 전체영역의 길이를 10,000 m로 하고,  $Q_{out} = 1,000 m^3/day$ ,  $n = 0.025$ ,  $q = 2 m^3/m^2-day$ ,  $S_0 = 1/10,000$ 로 하되 절점간격을 10 m, 100 m, 500 m, 1,000 m로 하여 계산한 수심분포를 구하여 절점간격이 줄어들어 따라 해가 일정한 값으로 수렴하는지 점검하였다.<sup>28)</sup> 계산결과는 Fig. 3에 나타내었다. 절점간격이 큰 경우에는 하류부위에서 진동이 발생하지만, 100 m 이하의 절점간격에서는 해가 거의 같음을 알 수 있었다. Fig. 3에는 표시되지 않았지만 절점간격이 더욱 감소함에 따라 수심이 점차 수렴하여 본 연구에서 적용한 수치해법이 타당함을 확인할 수 있었다. 한편, 주어진 조건에서 수심은 하류로 갈수록 감소하지만 선형으로 변하지는 않고 하류로 갈수록 수심이 더 급하게 감소함을 알 수 있었다.

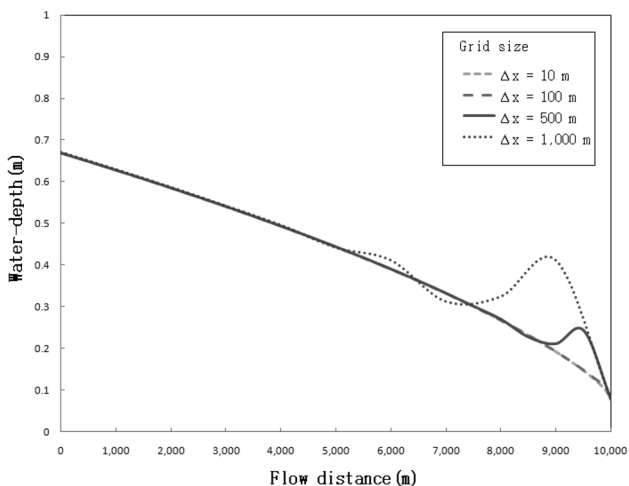


Fig. 3. Change in water-depth profiles in response to the grid sizes of 10 m, 100 m, 500 m and 1,000 m ( $S_0 = 1/10,000$ ,  $n = 0.025$ ,  $q = 2 m^3/m^2-day$ ,  $Q_{out} = 1,000 m^3/day$ ,  $L = 10,000 m$ ).

#### 4. 시나리오 분석

본 연구에서 개발된 모델을 이용하여 인공하천에서의 다양한 조건에 따른 수심분포와 유속분포를 파악하였다. 먼저 인공하천에서  $q = 2 m^3/m^2-day$ ,  $n = 0.025$ ,  $Q_{out} = 1,000 m^3/day$ ,  $L = 10,000 m$ 로 고정되고,  $S_0$ 가 0, 1/10,000, 2/10,000, 3/10,000, 그리고 4/10,000로 변하는 경우를 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구의 나머지 부분에서 절점간격은 모두 10 m로 하였다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이 모든 경우에 하류로 갈수록 수심은 감소하였으며, 이는 하류로 갈수록 하상으로의 침투에 의해 하천유량이 감소하였기 때문이다. 또한, 하상의 기울기가 완만할수록 하천수심은 증가하였으며, 그 기울기가 0, 1/10,000, 2/10,000, 3/10,000, 그리고 4/10,000로 증가하는 경우 최대수심은 각각 87.4 cm, 66.9 cm,

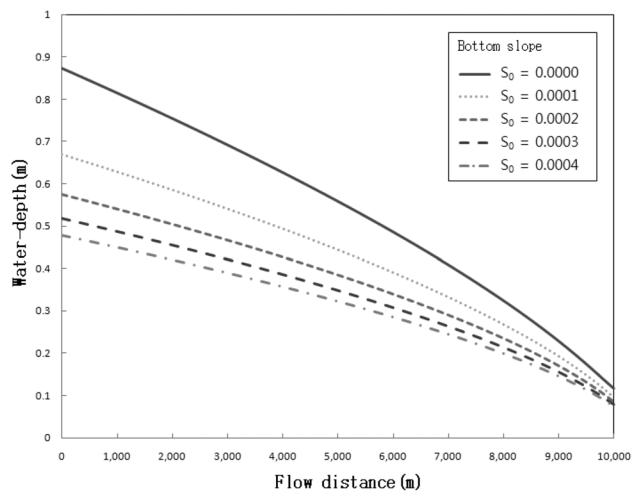


Fig. 4(a). Water-depth profiles according to the bottom slope of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $q = 2 m^3/m^2-day$ ,  $n = 0.025$ ,  $Q_{out} = 1,000 m^3/day$ ,  $L = 10,000 m$ ).

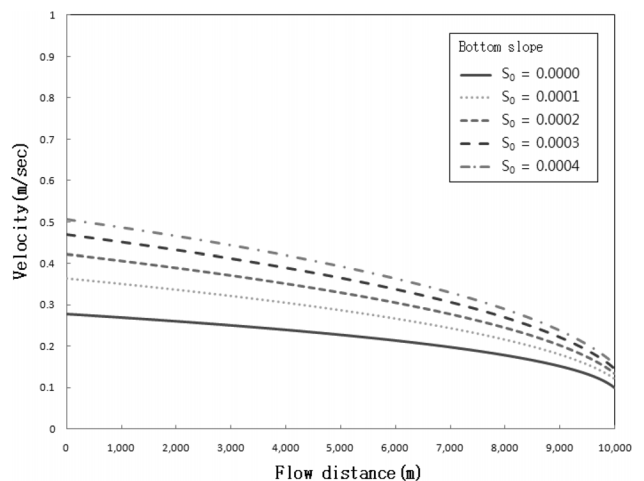


Fig. 4(b). Velocity distributions according to the bottom slope of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $q = 2 m^3/m^2-day$ ,  $n = 0.025$ ,  $Q_{out} = 1,000 m^3/day$ ,  $L = 10,000 m$ ).

57.4 cm, 51.8 cm, 그리고 47.9 cm로 감소하였다. 이로부터 하상의 기울기가 증가함에 따라 수심은 감소하지만 기울기가 클수록 그 감소폭은 점차 줄어들음을 알 수 있었다.

Fig. 4(b)에는 하상의 기울기 변화에 따른 하천유속의 변화를 나타내었다. 모든 기울기에서 하류로 갈수록 하천유속이 감소하였고 이는 하상으로의 침투에 의해 하류로 갈수록 하천유량이 감소하였기 때문이다. 또한, 수심보다 유속이 바닥의 기울기에 의한 영향을 더 작게 받음을 알 수 있다. 하상의 기울기가 없는 경우 최대유속은 27.8 cm/sec 이었으며, 이 기울기가 1/10,000, 2/10,000, 3/10,000, 그리고 4/10,000로 증가함에 따라 최대유속은 각각 36.3 cm/sec, 42.3 cm/sec, 46.9 cm/sec, 그리고 50.7 cm/sec로 증가하지만 하상의 기울기가 커짐에 따라 그 증가폭은 점차 둔화됨을 알 수 있었다. 한편, 수심과 유속 모두 상류 약 7,000 m에서는 일정한 기울기로 감소하다가 하류 약 3,000 m 부위에서는 비교적 급하게 감소함을 알 수 있었다. 이로부터 하상의 기울기가 급할수록 하천유속이 증가하고 하천수심은 감소하여 하상여과에 유리함을 알 수 있었다. 하천유속이 클수록 하상의 폐색이 방지되고, 수심이 얕을수록 인공하천에 설치되는 격막의 높이가 낮아도 되기 때문이다. 그러나 최하류부에서 잔류유량의 배수에 소요되는 동력을 절약하기 위해서는 저류지 바닥의 최저고도가 너무 낮지 않아야 하고, 또한 하상의 기울기가 클수록 상류부 하상의 고도가 높아져서 비상지 저류용량이 감소하기 때문에 하상의 기울기는 2/10,000 이하가 적당한 것으로 판단되었다.

인공하천에서  $S_0 = 2/10,000$ ,  $n = 0.025$ ,  $Q_{out} = 1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $L = 10,000 \text{ m}$ 이고, 하상에서의 침투율  $q$ 가 0,  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ,  $2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ,  $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 로 변할 때의 하천수심을 계산하여 Fig. 5(a)에 나타내었다. 침투율이 0인 경우 최대수심은 9.7 cm이었고, 침투율이  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ,  $2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ,  $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 로 증가하는 경우 최대수심은 각각 39.6 cm, 57.4 cm, 71.7 cm로 증가하여 침투율이 커질수록 최대수심은 증가하고 수면경사도 커졌으나 침투율 증가에 따라 그 효과는 점차 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 5(b)에는 하상에서의 침투율 변화에 따른 하천유속의 변화를 나타내었다. 모든 침투율에서 하류로 갈수록 유속이 감소하였고 이는 하류로 갈수록 침투에 의해 하천유량이 감소하였기 때문이다. 침투율이 0인 경우 최대유속은 11.9 cm/sec이었고, 침투율이  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ,  $2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ,  $3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 로 증가함에 따라 최대유속은 각각 32.2 cm/sec, 42.3 cm/sec, 그리고 50.0 cm/sec로 증가하며, 앞에서와 같이 침투율이 증가할수록 최대유속의 증가율은 점차 둔화됨을 알 수 있었다. 하상여과에서 침투율과 여과거리 또는 여과수의 토양내 체류시간은 여과수의 수질과 큰 관련이 있으며, 보통의 하상여과에서는 침투율을 2~3  $\text{m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 로 설계하고 이 경우에도 비교적 양질의 여과수를 얻을 수 있기 때문에<sup>25,29)</sup> 인공하천에서의 적정 침투율은  $2.5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ 가 적당한 것으로 보았다.

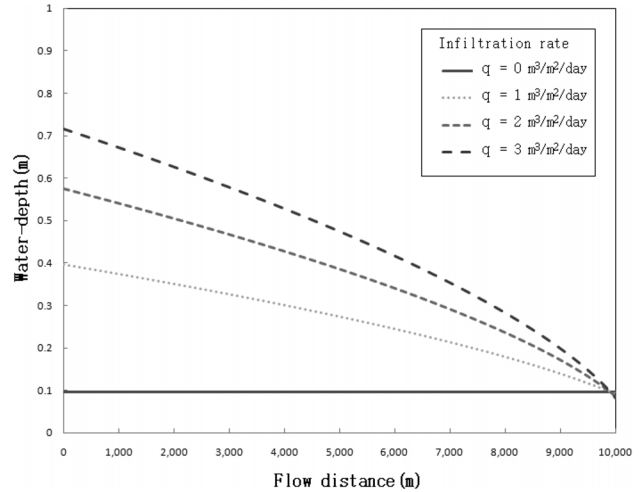


Fig. 5(a). Water-depth profiles according to the infiltration rate of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $n = 0.025$ ,  $Q_{out} = 1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $L = 10,000 \text{ m}$ ).

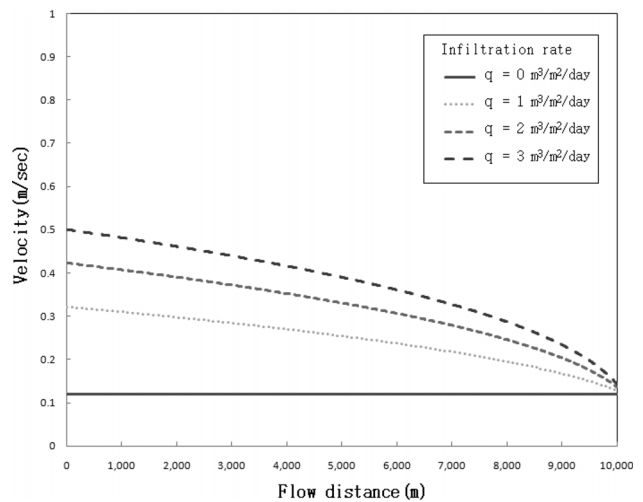


Fig. 5(b). Velocity distributions according to the infiltration rate of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $n = 0.025$ ,  $Q_{out} = 1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $L = 10,000 \text{ m}$ ).

하상의 조도계수  $n$ 이 0.020, 0.025, 그리고 0.030으로 변하고, 나머지 매개변수들은  $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-day}$ ,  $Q_{out} = 1,000 \text{ m}^3/\text{day}$ ,  $L = 10,000 \text{ m}$ 로 고정된 경우 하천수심과 유속을 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 조도계수가 증가할수록 하천유속은 감소하고 수심은 증가하였다. 그러나 조도계수가 커질수록 이의 증가에 따른 수심증가나 하천유속감소는 점차 둔화됨을 알 수 있었다. 지금까지의 조건에서는 인공하천의 유속이 크지 않아 이러한 유속으로 하상여과를 운영하는 경우 하상의 폐색이 우려된다. 이에 대한 해결책으로는 간헐적으로 상당한 유속으로 물을 흘려주거나 다른 방법으로 하상의 폐색을 제거할 필요가 있다. Hubbs 등<sup>21)</sup>에 의하면 폐색이 발생하지 않는 유속은 0.9 m/sec 이상이라고 하며, 침투율이 0이고  $S_0 = 2/10,000$ ,  $n =$

0.025에서 0.9 m/sec의 등류유속을 얻기 위해서는 인공하천의 단위 폭당 하천유량이 155,000 m<sup>3</sup>/day, 수심은 2 m에 달해야 하고, 하상의 기울기를  $S_0 = 4/10,000$ 로 하더라도 하천폭 1m당 하천유량이 93,000 m<sup>3</sup>/day이어야 하므로 유속 증가에 의한 폐색제거는 경제적인 방법이 아니라고 할 수 있다.

다른 방법으로는 토양대수층처리에서 사용되는 방식을 응용할 수 있으며, 기계적인 방법으로 하상을 청소하거나,<sup>9)</sup> 일정기간 하상을 건조시켜 폐색에 의해 발생한 표층의 슬러지 케익을 건조박편으로 변성시켜 제거하는 방법<sup>30)</sup> 등이 타당할 것으로 판단된다. 따라서 하상은 최대 0.5 m/sec의 유속에 저항할 수 있는 입자로 구성되면 충분할 것이고, 이는 약 5 mm의 입경에 해당된다.<sup>22)</sup> 한편, 자갈바닥으로 구성된 인공수로의 조도계수는 0.025~0.030이고,<sup>31)</sup> 본 인공하

천의 격벽면은 매끄러운 재질로 설치되므로 본 연구의 인공하천에서 평균조도계수는 0.026으로 본다.

인공하천의 길이  $L$ 이 5,000 m, 10,000 m, 그리고 15,000 m로 다양하고  $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day,  $n = 0.026$ ,  $Q_{out} = 1,000$  m<sup>3</sup>/day로 고정된 경우 수심분포와 유속분포를 계산하여 Fig. 7에 나타내었다. 인공하천의 길이가 증가함에 따라 수심과 유속은 증가하였으며, 증가되는 정도는 하천의 길이가 증가함에 따라 둔화됨을 알 수 있었다. 하천길이가 15,000 m인 경우 최대유속이 0.53 m/sec에 달하여 폐색방지에 가장 유리하지만 이때의 최대수심은 0.846 m로 깊어서 격벽의 높이가 높아야 할 뿐 아니라 격벽의 길이도 길어서 설치비용이 더 많이 드는 단점이 있다. 이에 더하여 수평집수관으로부터 여과수를 집수정으로 유도하는 도수관의 길이가 길어져야 하는 단점도 추가된다. 따라서 주어

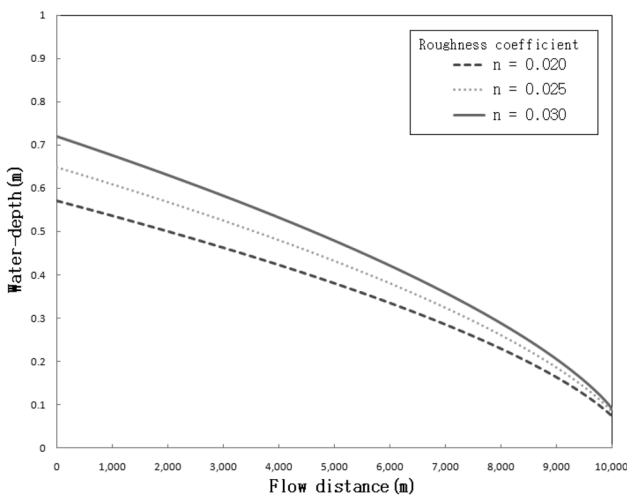


Fig. 6(a). Water-depth profiles according to the Manning' s n of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day,  $Q_{out} = 1,000$  m<sup>3</sup>/day,  $L = 10,000$  m).

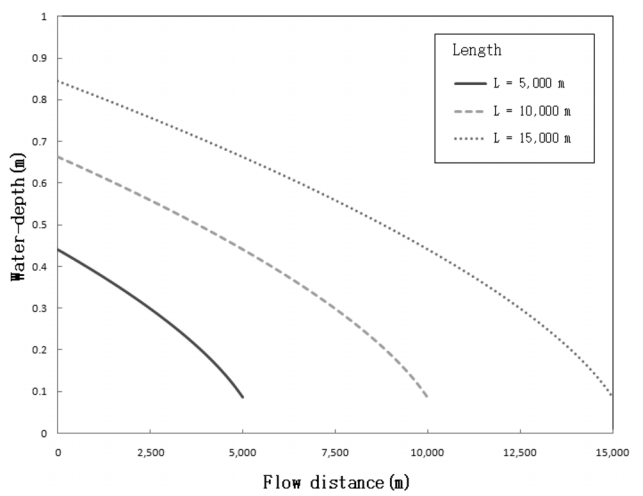


Fig. 7(a). Water-depth profiles according to the length of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day,  $n = 0.026$ ,  $Q_{out} = 1,000$  m<sup>3</sup>/day).

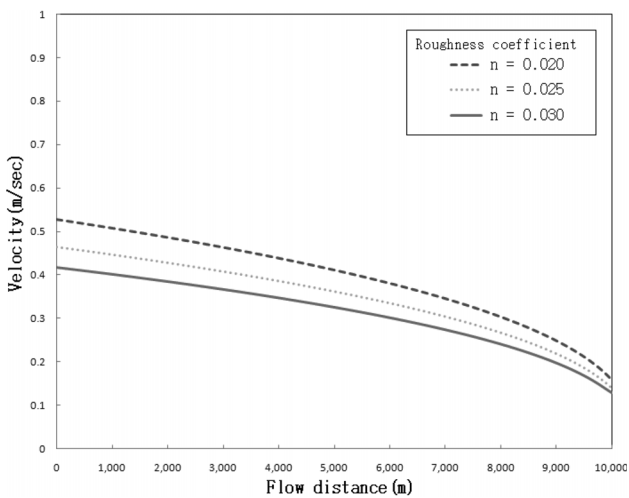


Fig. 6(b). Velocity distributions according to the Manning' s n of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day,  $Q_{out} = 1,000$  m<sup>3</sup>/day,  $L = 10,000$  m).

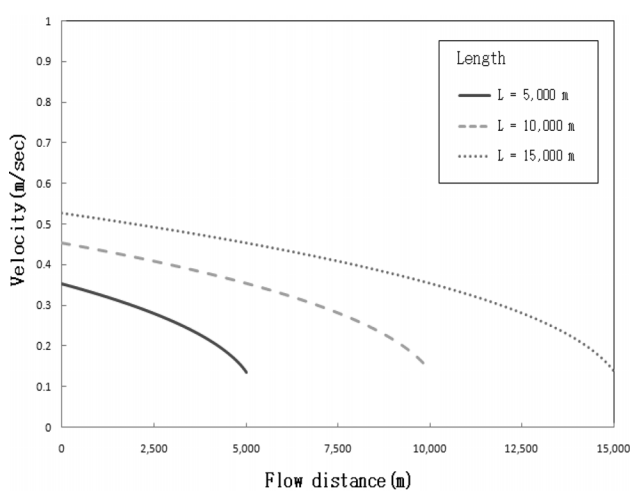


Fig. 7(b). Velocity distributions according to the length of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-day,  $n = 0.026$ ,  $Q_{out} = 1,000$  m<sup>3</sup>/day).

진 넓이의 저류지에서 인공하천의 폭과 길이를 결정할 때 가급적 빠른 하천유속을 확보할 수 있도록 긴 하천을 형성하는 것이 바람직하지만 전체적인 경제성을 높이기 위해서는 다른 요소들을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

마지막으로 최하류에서의 잔류유량  $Q_{out}$ 이 1,000  $m^3/day$ , 3,000  $m^3/day$ , 5,000  $m^3/day$ , 10,000  $m^3/day$ , 그리고 20,000  $m^3/day$ 로 변하고,  $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5 m^3/m^2\text{-day}$ ,  $n = 0.026$ ,  $L = 10,000 m$ 로 고정된 경우 하천수심과 유속의 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 최하류에서의 잔류유량이 증가함에 따라 하천유속과 수심이 증가하였으나 이들의 증가율이 잔류유량의 증가율보다는 작음을 알 수 있었다. 또한, 잔류유량 증가에 따라 상류보다는 하류에서의 수심과 유속이 더 빨리 증가하여, 상류에서의 격벽의 높이증가는 최소화하면서 하류의 폐색을 더 억제하게 되어 하상여과에 보다 유리한 조건을 형성함을 알 수 있었다. 또한, 잔류유량이 약 5,000  $m^3/$

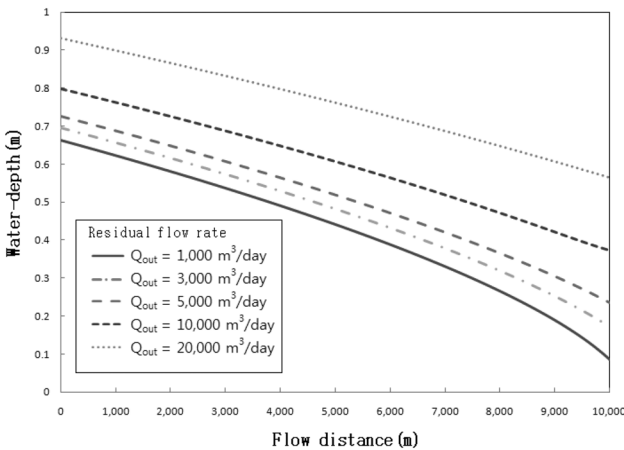


Fig. 8(a). Water-depth profiles according to the flow rate at the end of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5 m^3/m^2\text{-day}$ ,  $n = 0.026$ ,  $L = 10,000 m$ ).

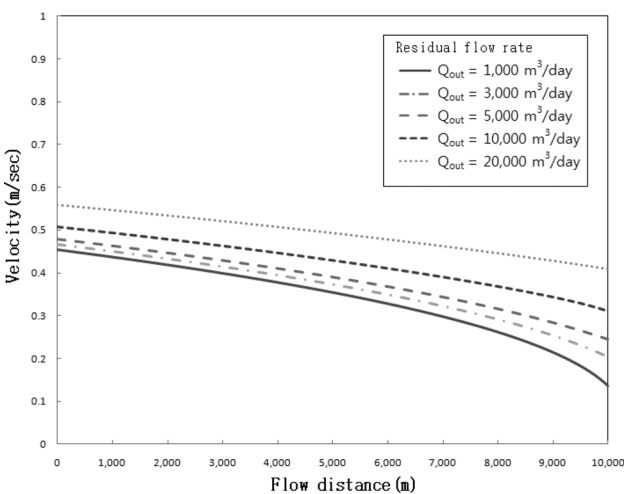


Fig. 8(b). Velocity distributions according to the flow rate at the end of the artificial stream of multi-purpose filtration pond ( $S_0 = 2/10,000$ ,  $q = 2.5 m^3/m^2\text{-day}$ ,  $n = 0.026$ ,  $L = 10,000 m$ ).

day 이상인 경우에는 하천수심과 유속의 감소가 전체구간에 걸쳐 거의 선형으로 발생하여, 잔류유량이 적은 경우 최하류 약 3,000 m부근에서 급격히 감소하는 현상과 비교되었다. 이로부터 잔류유량이 클수록 하상여과에 유리함을 알 수 있으나 잔류유량은 여과저류지로부터 분류하천으로 되돌려야 하므로 이에 대한 고려가 필요할 것이다. 만약 보가 설치되지 않거나 낙차가 작은 경우에는 잔류유량을 분류로 되돌리기 위해 양수가 필요하지만, 4대강 사업<sup>2)</sup>에서처럼 5 m 이상으로 큰 낙차가 발생하는 보 인근에서는 양수가 불필요하므로 잔류유량을 크게 할 수 있어서 본 설비의 효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

인공하천에서 하상여과를 수행하는 경우 상류로 갈수록 하상이 높아지고 수심도 깊어진다. 이와는 달리 수평집수관과 도수관은 수평으로 설치되어 도수관의 매설깊이 즉, 여과수의 여과거리는 상류로 갈수록 길어지게 된다. 하상으로의 침투율은 Darcy의 법칙에 따라 여과수의 동수경사에 비례하므로 하상이 높아짐에 따른 침투율 증가는 발생하지 않지만 수심이 깊어짐에 따른 침투율 증가는 가능하다. 그러나 여과수를 최종적으로 집수하는 집수정이 최하류에 설치되는 경우 상류에서 포집된 여과수가 수평집수관과 도수관을 통해 집수정까지 흐르는 동안 수두손실이 발생하여, 하천수의 흐름과 마찬가지로 상류층의 높은 수위에 의한 에너지를 상쇄하게 된다. 따라서 하상의 침투율  $q$ 는 인공하천의 모든 지점에서 일정한 값을 유지하도록 설계가 가능하고, 본 연구에서 이를 일정하다고 가정한 것은 타당하다고 할 것이다.

## 5. 결론

본 연구에서 개발한 수학적 모델을 면적이 100 ha인 강변저류지에 적용하여 각종 시나리오에 대한 분석결과 인공하천의 종단경사는 2/10,000, 하상에서의 침투율은 2.5  $m^3/m^2\text{-day}$ 가 적당한 것을 알 수 있었다. 이때 수심은 1 m 이내이고 하상에서의 Manning의 조도계수는 0.026 정도로 예측되었으며, 인공하천의 길이가 길수록 더 유리함을 알 수 있었다. 한편, 인공하천에서 빠른 하천유속을 발생시켜 하상여과에 수반하는 하상의 폐색을 방지하는 방법은 효율적이지 않음을 알 수 있었고, 낙차가 큰 보의 주변에서 본 설비의 효율이 더 증대함을 알 수 있었다.

KSEE

## 참고문헌

1. 오규창, “사례를 통한 천변저류지 계획시 고려사항,” 물과 미래, 40(4), 20~26(2007).
2. 4대강 살리기 추진본부, “4대강 살리기 마스터플랜,” 국토해양부(2009. 7).
3. 대구광역시, “상수도사업 100년,” (2006).

4. 김승현, “우리나라에서 강변여과와 하상여과의 비교,” 대한환경공학회지, **29**(10), 1154~1162(2007).
5. Todd, D. K., “Ground Water Hydrology, Chap. 11,” John Wiley & Sons, Inc.(1959).
6. Kanarek, A. and Michail, M., “Groundwater recharge with municipal effluent: DAN region reclamation project, Israel,” *Water Sci. Technol.*, **34**(11), 227~233(1996).
7. Bouwer, H., Rice, R. C. and Escarceca, E. D., “High-rate land treatment I : Infiltration and hydraulic aspects of the Flushing Meadows project,” *J. WPCF*, **46**(5), 834~843(1974a).
8. Bouwer, H., Lance, J. C. and Riggs, M. S., “High-rate land treatment II : Water quality and economic aspects of the Flushing Meadows project,” *J. WPCF*, **46**(5), 844~859(1974b).
9. Bouwer, H. and Rice, R. C., “Renovation of wastewater at the 23rd Avenue rapid infiltration project,” *J. WPCF*, **56**(1), 76~83(1984).
10. Cho, C. M., “Oxygen consumption and denitrification kinetics in soil,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 756~762(1982).
11. 김승현, 정장식, “하상여과를 이용한 금호강 수질개선 연구,” Environmental Research(영남대학교 환경문제연구소) **18**(2), pp. 73~86(1999).
12. 성치돈, 안규홍, 이용훈, 공인철, 김승현, “하상여과를 이용한 하천수질 개선연구-모델전개 및 모델 매개변수 결정,” 대한환경공학회지, **25**(4), 486~494(2003a).
13. 성치돈, 안규홍, 이용훈, 공인철, 김승현, “하상여과를 이용한 하천수질 개선연구-모델해석 및 검증, 민감도 분석,” 대한환경공학회지, **25**(5), 580~587(2003b).
14. Ahn, K.-H., Moon, H.-J. and Kim, S.-H., “A Kinetic Analysis of Organic Release from the Aquifer Soil in Riverbank/bed Filtration,” *Environ. Eng. Res.*, **10**, 199~204(2005).
15. 김승현, 손동빈, 안규홍, “하상여과를 이용한 투수계수 감소현상 연구,” 대한토목학회지, **25**(4B), 301~308(2005).
16. 안규홍, 손동빈, 김승현, “하상여과 모형에서 유기물과 질소의 제거,” 대한환경공학회지, **27**(5), 525~534(2005a).
17. 안규홍, 문형준, 김경수, 김승현, “하상여과의 집수관 모형에서 잔류수두와 유입율 분포에 관한 실험연구,” 대한환경공학회지, **27**(12), 1305~1310(2005b).
18. 김승현, “하상여과의 수평집수관에서 측방향 설계유속-모형실험결과와 실규모 적용,” 대한환경공학회지, **28**(8), 884~887(2006).
19. 김우철, 김승현, “하상여과 모형에서 수평집수관의 조도계수,” 대한환경공학회지, **29**(2), 176~183(2007).
20. Kim, S.-H., Ahn, K.-H. and Ray, C., “Distribution of discharge intensity along small-diameter collector well laterals in a model riverbed filtration,” *J. Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, pp. 493~500(2008).
21. Hubbs, S., Ball, K., Haas, D. L. and Robison, M. J., “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(2002).
22. Yang, C. T., “Sediment Transport-Theory and Practice,” Krieger Publishing Company, Malabar, Florida(2003).
23. Hwang, Ned H. C., Houghtalen, R. J., “Fundamentals of hydraulic engineering system,” 3rd ed., Prentice Hall(1996).
24. Chow, Ven Te, “Open-channel hydraulics,” McGraw-Hill Book Company(1959).
25. 경산시, “경산시 금호강 하상여과공법 적용을 위한 예비 타당성조사 학술용역 보고서,” (2006. 6).
26. Streeter, V. L., “Fluid Mechanics,” 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, Inc.(1958).
27. Kreyszig, E., “Advanced Engineering Mathematics,” 8th ed., Wiley, New York(1999).
28. Fletcher, C. A. J., “Computational techniques for fluid dynamics, volume I,” 2nd ed., Springer-Verlar, New York(1991).
29. 경상북도, “하상여과를 이용한 오염부하량 저감방안에 대한 학술연구용역 보고서,” (2007, 8).
30. Pescod, M. B., “Wastewater treatment and use in agriculture-FAO irrigation and drainage paper 47,” FAO, Rome (1992).
31. 안수환, 수리학, 동명사(2000).