

Direct Horizontal-Flow Roughing Filtration의 조립 여상에서의 입자 제거 모델링

Modeling of Particle Removal in the Coarse Media of Direct Horizontal- Flow Roughing Filtration

안효원¹ · 박노석^{1,*} · 이선주¹ · 이경혁¹ · 왕창근²

Ahn, Hyo-Won¹ · Park, No-Suk^{1,*} · Lee, Sun-Ju¹ · Lee, Kyung-Hyuk¹ · Wang, Chang-Keun²

1 한국수자원공사 수자원연구원

2 충남대학교 환경공학과

(2005년 2월 23일 논문 접수; 2005년 6월 8일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Horizontal-Flow Roughing Filtration (HRF) is one of alternative pretreatment methods e.g. prior to Slow Sand Filtration (SSF). However, some of its limitations are that the effluent quality drops drastically at higher turbidity (>200 NTU) and at higher filtration rate (>1 m/h). To overcome these drawbacks, we suggested Direct Horizontal-Flow Roughing Filtration (DHRF), which is a modified system of Horizontal-Flow Roughing (HRF) by addition of low dose of coagulant prior to filtration. In this study to optimize the DHRF configuration, a conceptual and mathematical model for the coarse compartment has been developed in analogy with multi-plate settlers. Data from simple column settling test can be used in the model to predict the filter performance. Furthermore, the model developed herein has been validated by successive experiments carried out. The conventional column settling test has been found to be an handy and useful to predict the performance of DHRF for different raw water characteristics (e.g. coagulated or uncoagulated water, different presence of organic matter, etc.) and different initial process conditions (e.g. coagulant dose, mixing time and intensity, etc.). An optimum filter design for the coarse compartment (grain size 20mm) has been found to be of 3 m/h filtration rate with filter length of 4-4.5 m.

Key words: Direct Horizontal-Flow Roughing Filter (DHRF), mathematical model, coarse media, optimum filter design

주제어: direct horizontal-flow filter, 수학적 모델, 조립 여재, 최적여과공정 설계

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0390, FAX: +82-42-860-0399, E-mail: nspark@kowaco.or.kr (Park, N.S.)

1. 서론

Horizontal-Flow Roughing Filtration(이하 HRF)는 완속 여과지의 전처리 공정으로 유럽에서 대체 전처리 공정으로 꾸준히 연구되어온 공정이다. 이미 유럽에서는 완속여과지의 전처리 공정으로 적정하고 효율이 어느 정도 검증된 공정으로 몇몇 국가(콜로비아, 탄자니아, 태국 등)에서는 중 또는 저탁도의 원수처리에 성공적으로 적용되어 왔다. 이에 Wegelin 등(1987)은 HRF에서 침전이 고액분리에서 주 메커니즘으로 작용하며, 충전된 여상은 슬러지가 축적될 수 있는 표면적을 증가시키는 역할을 한다고 언급하였다. 그러나 HRF의 경우 중요한 제한사항을 가지는데, 실규모 및 실험실 규모의 공정 실험 결과로부터 200NTU 이상의 고탁도 또는 1m/h 이상의 여과 속도 운전에서는 탁도제거율과 여과거리가 급속하게 악화되는 현상이 나타났다(IWACO, 1990; Ahsan 등, 1991).

이러한 HRF의 단점을 보완하기 위해, 네델란드에서는 수정·보완된 공정으로 direct horizontal-flow roughing filtration(이하 DHRF)에 대한 연구가 수행되었다. DHRF의 경우 HRF와 비슷하지만, 여과공정 이전에 응집제의 주입이 추가된 공정이다. Ahsan 등은 실험실 규모의 실험을 통하여 DHRF는 HRF에 비해 약 1.6배의 여과거리를 나타내며, 약 3-5m/h의 여과속도에서도 탁도제거율이 약 40% 정도 증가하는 것으로 나타냄을 연구하였다(Ahsan 등, 1991). 또한 DHRF 공정에서 입자와 플록의 제거측면에서 첫 번째 조에 있는 조립 여재(coarse media)는 커다란 입자 수집기의 역할을 하며, 이 조에서는 침전이 입자를 제거하는 주된 메커니즘임을 규명하였고 후단의 미세 여재(finier media) 충전조는 범용적인 심층여과와 비슷한 역할을 함을 규명하였다.

실제 여과공정이 관여하는 한, 두 가지의 중요한 인자가 여과지속시간을 결정하는데 이용되어왔다. 그것은 수도손실과 여과유출수의 수질이다. DHRF 공정에서도 마찬가지로 모델의 수립이 가능하다면 이 두 가지 요소를 예측할 수 있는 방법론의 제시가 절실히 요구되고 있다. 그러나 DHRF 공정에서 첫 번째 조인 조립 여재에 있어서의 수도손실은 그 변화량

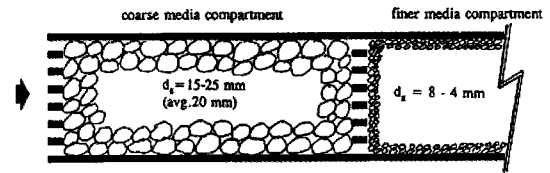


Fig. 1. Longitudinal cross section of DHRF.

이 매우 작으므로(약 4m에 대해 2~3cm) 본 연구에서는 파일럿 규모의 실험 결과를 토대로 여재 거리에 따른 수질을 쉽게 예측하는 개념적이고 수학적인 모델을 개발하고자 하였다. 또한 본 모델을 이용하여 DHRF를 최적화시키기 위해 모델 인자 결정을 할 수 있는 방법론을 제시하고자 하였다.

2. DHRF에서의 입자 제거 모델 이론

다음 Fig. 1은 단순화된 DHRF 공정에서 조립 여재 충전조의 측면도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이, 각각 다른 크기의 여재가 충전되어 있으며, 이에 따라 공극도 달라진다. 유입되는 원수는 좌에서 우로, 조립 여재에서 미립 여재쪽으로 수평방향의 주된 흐름을 가지며 처리된다.

여과 거리에 따른 수질 및 제거율을 예측하는 입자 제거 모델 개발을 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 여재는 각기 다른 유효 입경의 두께로 구성된 다중판(multiple-plate) 침전지로 가정한다(Fig. 2 참조).
- 각 여재의 수직 단면으로 처리되는 부유물질은 등방성을 가진다.
- 퇴적은 자갈 및 각층에 균등하게 일어난다.
- 입자의 제거는 1형 침전(ideal discrete settling)을 따른다.

침전이 관여됨에 따라, 월류율(overflow rate)은 침전지의 성능을 평가하는 가장 중요한 인자 중에 하나이다. 월류율에 기초한 조립 여재에서 입자 제거 모델을 개발하기 위해서는 조립 여상을 다중판 침전지로 인식하는 개념 전환이 필요하다(Huisman, 1986). 이에 본 연구에서는 Fig. 2에서 나타내듯이, 상호간의 공극은 동일한 것으로 가정하고 판(plate)의 두께는

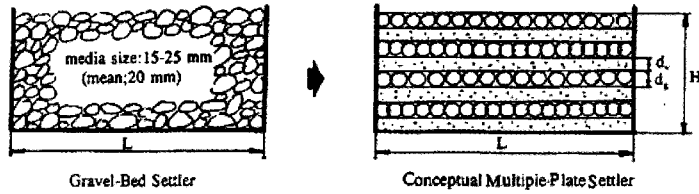


Fig. 2. Conceptual Configuration for the First Coarse Compartment of DHRF.

평균 자갈의 입경(d_g)으로 가정하고 각 판 사이의 공간(유효 공극 깊이; 식 (4) 참조)은 d_v 로 한다.

조의 길이는 L , 넓이는 B , 높이는 H 로 표현하였다. 또한, 각 판으로 흐르는 유량, q 는 유입 총유량, Q 를 판수, n 으로 나눈 값이다.

월류률(overflow rate; V_o)는 다음 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{d_v}{\theta} = \frac{1}{N_p} \cdot \frac{Q}{B \cdot L} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, θ 는 공극 부피에 기초한 수리학적 체류시간을 의미한다. 식 (1)이 표현하는 월류률은 일반적인 다중판 침전지에 적용되는 사항이다. 따라서, 식 (1)에는 여재 입자의 크기, 여상 거리, 공극 등의 DHRF 여과 시스템의 물리적인 특성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 두 가지 인자에 영향을 받게 되는데 하나는 판상 침전지의 수(the number of plate settler), N_p , 다른 하나는 유효 표면적(surface area), $B \cdot L$ 이다.

2.1. 판상 침전지의 수

판상 침전지의 수는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$N_p = \frac{H}{d_v + d_g} \quad \text{식 (2)}$$

판사이의 공간 부피의 비는 초기 공극, ϵ_0 과 같다고 가정하고

$$\epsilon_0 = \frac{V_v}{V_f} = \frac{N_p \cdot B \cdot d_v \cdot L}{B \cdot H \cdot L} \quad \text{식 (3)}$$

여기서 V_v 는 충전조 내의 공극 부피, V_f 는 조 전체의 부피를 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)로부터 유효 공극 깊이, d_v 를 구할 수 있다. 다음 식 (4)로 표현된다.

$$d_v = \frac{\epsilon_0}{1 - \epsilon_0} \cdot d_g \quad \text{식 (4)}$$

식 (4)를 식 (2)에 대입하면 판상 침전지의 수(식 (2))를 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$N_p = \frac{(1 - \epsilon_0) \cdot H}{d_g} \quad \text{식 (5)}$$

식 (5)로부터 판상 침전지의 수는 초기 공극, 여상의 높이 그리고 여재 입자의 크기의 함수가 된다. 즉 입자의 유효경이 작을수록, 여상의 높이가 높을수록 판상 침전지의 수는 증가한다.

2.2. 유효 표면적

식 (1)에서 월류률을 계산하기 위해서는 유효 수표면적(effective surface area)이 결정되어야 한다. 왜냐하면 개념적인 판상 침전지가 구멍과 조립 여재(자갈)로 구성되어 있어 이러한 면적이 슬러지가 직접 퇴적되는 장소를 제공하기 때문이다. 이에 제거 효율은 직접적으로 유효 표면적에 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 개념상의 충전조로부터 유효 표면적을 얻기 위해 step by step 방법을 사용하였다.

Fig. 3에서 step 1은 조립 여재 충전조를 일반적인 판상 침전지로 전환하는 과정을 나타낸 것이다. 즉, 개념적인 판상 침전지의 총 면적은 유효 계수, K_E 를 도입함으로써 조정한다. 유효 계수, K_E 는 Fig. 3의 (d)와 (e)에서와 같이 여재 입상에 퇴적된 슬러지의 사면 안전도를 고려한 형상(geometry) 개념을 도입하기 위함이며, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

K_E = effectiveness rate of flat area * rate of effective angle for slope stability of a sludge deposited on the grain

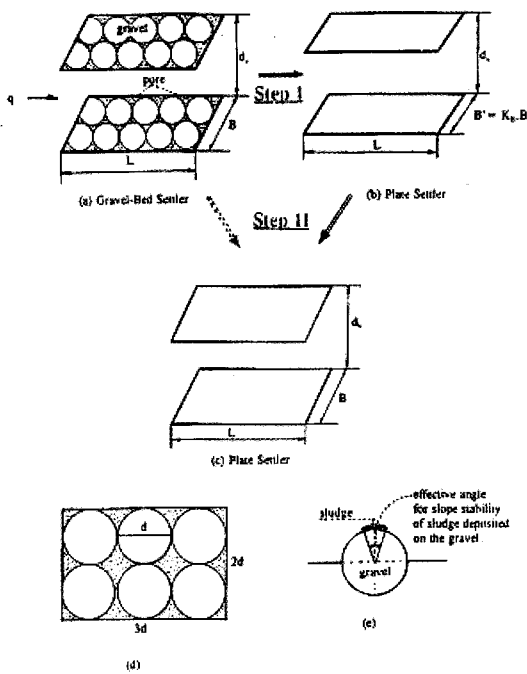


Fig. 3. Physical presentation of effective surface area..

$$\begin{aligned}
 &= [(total\ area - pore\ area) / total\ area] \times (effective\ angle / 180^\circ) \\
 &= [6d^2 - 6(d^2 - \pi/4 d^2)] / 6d^2 \times (30^\circ \sim 45^\circ) / 180^\circ \\
 &= \pi/4 \times (1/6 \sim 1/4) \\
 &= 0.13 \sim 0.19 \qquad \text{식 (6)}
 \end{aligned}$$

상기 식에서 effective angle을 30°~45°로 설정한 것은 1992년 Wambulwa의 연구에서 인용하였다.

즉, 자갈로 충전된 여상내의 유효 표면적은 30°~45° 경사의 판상 침전지 총 유효표면적의 약 13~19% 정도이다. K_E 로 표시되는 자갈 충전조의 침전 성능은 기존 판상 침전지의 성능에 비해 매우 작은 것을 알 수 있으나, 입자 제거측면에서 판상의 다공(holes)을 통해 제거되는 가능성이 추가됨에 따라 자갈 충전 다중 판상의 다공의 효과도 고려되어야 한다.

침전의 측면에서, 침강속도가 월류율보다 높은 경우 완벽히 제거되는 것과 마찬가지로, 월류율보다 작은 속도를 가지는 입자의 경우 여재를 통과하게 된다. 따라서 다음 Fig. 4에서는 입자의 속도가 월류율에 비해 크지만 여상의 유효 표면적내에 축적되는 입

자부분을 고려하는 개념을 설명하고자 한다. Fig. 4는 입자의 침전 경로에 대해 개념적으로 도시하고 있다. 그림에서 case 1은 유효계수(K_E)만으로 유효 표면적을 예측하는 개념인데 이 경우 공극에 의한 효과가 포함되지 않아 실제 입자 제거율보다 과소 예측하는 경향이 초래된다(Ahn, 1992).

공극의 효과에 의한 제거(case 2)를 포함하기 위해서, 총유효계수(K)의 개념을 도입하고자한다. 이 계수는 월류율보다 큰 속도를 가지는 입자라 할지라도 입자가 중력방향으로 표류되는 효과를 나타내는 계수이다. 본 연구에서 총유효계수(K)는 다음과 같이 표현한다.

$$K = K_E \times a \qquad \text{식 (7)}$$

여기서 a 는 표류계수(drift coefficient: >1.0)이다. 그러나 표류계수의 경우 입자와 여상의 물리적인 특징 및 액상의 변수들이 관계되어 정확한 값을 도출하기에는 불가능하다.

이에 각 판상 침전지상의 자갈의 전체 투영면적은 월류율보다 보다 큰 속도를 가지는 입자의 침전에 관여하게된다. 계산에서 전체 투영면적, $B \cdot L$ 을 고려하는 이유는 다음 두 가지이다. 첫째, 총연장, L 은 수리학적 체류시간의 결정에 관여한다. 이에 공극 사이로 통과하는 부분을 제외하고 월류율(총연장, L 의 함수)보다 큰 침강속도를 가진 입자들은 제거가 되며 둘째, 월류율(V_0)보다 큰 침강속도를 가지는 입자중 공극 사이를 지나는 입자는 하부 층(subsequent layer)에 의해 제거될 가능성이 높기 때문이다.

따라서, 월류율을 예측하는 식은 식 (1), 식 (5) 및 $Q = V_f \cdot B \cdot H$ (V_f : 여과속도, $B \cdot H$: 여상의 수평 면적)를 조합함에 다음 식 (8)로 표현할 수 있다.

$$V_0 = \frac{1}{1 - \epsilon_0} \cdot \frac{1}{L} \cdot V_f \cdot d_g \qquad \text{식 (8)}$$

다중판 침전지 기초이론에 근거한 상기 식 (8)의 월류율을 표현하는 식은 Yao(1969)에 의해 개발된 shallow-depth settler에서의 월류율 표현식과 형태가 같아졌다. 다음 식 (9)은 Yao에 의해 제한된 월류율을 예측하는 식이다.

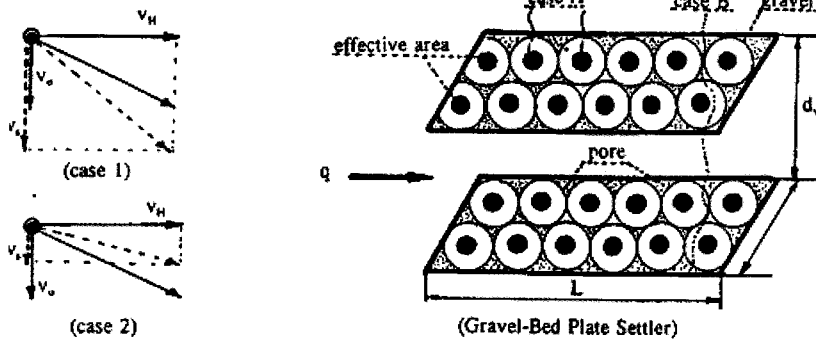


Fig. 4. Conceptual Diagram on Particle Settling.

$$V_0 = \frac{\omega \cdot V_{avg}}{\sin \theta + L \cdot \cos \theta} \quad \text{식 (9)}$$

여기서 ω 는 경사판의 간격이며, L 은 경사판 표면의 길이, 그리고 θ 는 경사판의 각도를 의미한다.

상기 식 (9)에서 $V_{avg} = V_f / \epsilon_0$, $\theta = 0^\circ$ (경사각이 없는 수평면이므로 0°)로 치환하고, 침전지의 깊이, d_v 를 대입하면 식 (8)과 같은 형태로 나타난다.

또한 본 연구에서는 자갈 여상에서 부가적으로 일어나는 응집효과를 고려하여 수리학적 체류시간을 모사하기 위해 하나의 변수를 도입하였다.

$$T_S = K_T \times T_G \quad \text{식 (10)}$$

여기서 T_S 와 T_G 는 칼럼(column) (Fig. 5 참조)과 자갈 여상에서의 각각의 체류시간을 나타내며, K_T 는 체류시간에 있어서의 상관계수(correlation factor; > 1.0)를 나타낸다. 본 연구에서는 식 (10)에서의 T_S 를 구하기 위해 1.0m 이상의 칼럼 침전장치를 구성하였으며 다음과 같은 관계식으로 표현하였다.

$$T_S = K_T \cdot \frac{H_S}{V_0} \quad \text{식 (11)}$$

여기서 H_S 는 컬럼 침전장치의 깊이를 나타낸다. 조건상 H_S 는 항상 1.0m 이상의 값을 가져야 한다. 식 (11)에 식 (9)를 대입하면 다음 식 (12)가 도출된다.

$$T_S = K_T \cdot (1 - \epsilon_0) \cdot L \cdot \frac{1}{v_f} \cdot \frac{1}{d_g} \cdot H_S \quad \text{식 (12)}$$

이에 상기 식 (12)를 이용하면 기존 칼럼 테스트를 통하여 입자의 조내 체류시간을 계산함으로써 제거율 예측할 수 있게 된다.

2.3. DHRF에서 입자제거효율 평가

본 연구에서는 모델을 이용하여 응집침전을 통한 입자 제거율을 평가하기 위해서, 간단한 실험을 수행하였다. DHRF에서 제거효율을 평가하는 방법은 다음과 같다(Fig. 5 참조).

- 여과를 수행하는 원수로 칼럼 침전실험을 수행한다.
- 상기 실험결과를 바탕으로 잔존 농도 vs. 각기 다른 체류시간에서의 칼럼의 깊이 관계 표 및 그래프를 작성한다.
- 식 (8)을 통해서 도출한 월류율을 바탕으로 정확한 체류시간(식 (10)을 계산한다. 또한 적절한 칼럼의 깊이, H_S 및 상관 계수, K_T 를 실험데이터로부터 선정한다.
- 작성된 그래프(Fig. 5 오른쪽 하단)에서 T_S 와 H_S 로 폐쇄된 면적을 계산한다. 침전이론에 의하며 그래프상의 이 면적 대 전체 면적이(area ABCE/area ABCD) 월류율보다 큰 침강속도를 가지는 입자의 제거율을 나타낸다.

3. 실험 방법

본 연구에서 모델을 검증하기 위해 수행한 실험 방법은 1992년 Wambulwa가 수행한 것과 비슷하다. 다음 Fig. 6은 본 연구에서 수행한 실험 장치를 나타낸

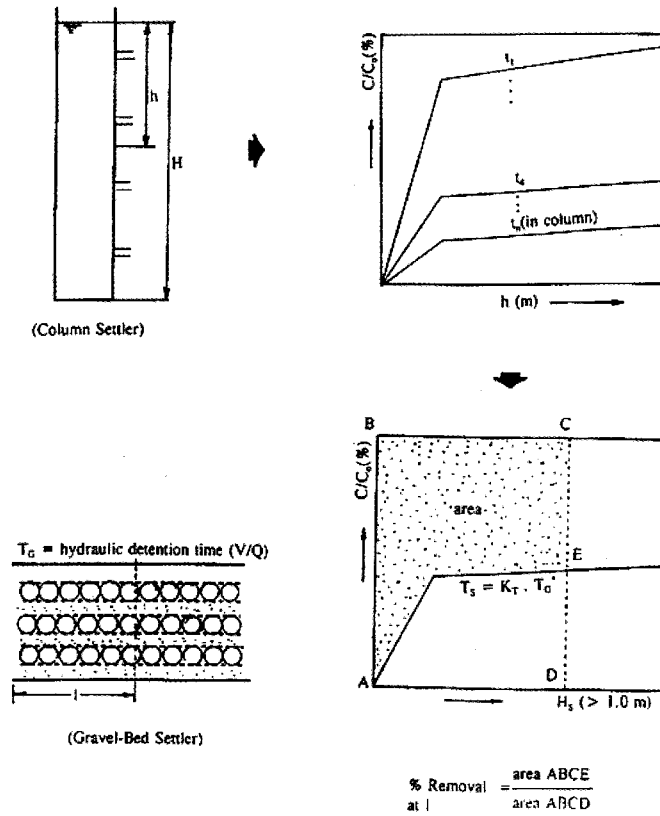


Fig. 5. Graphical Presentation of method for evaluation of Removal Efficiency on DHRF.

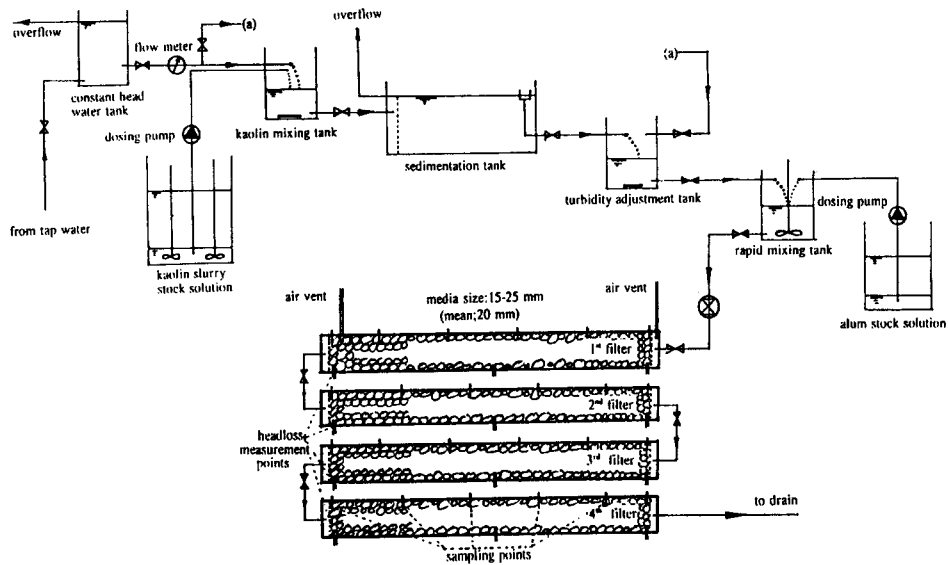


Fig. 6. Schematic Plan of Experimental Set Up for DHRF.

Table 1. Summary of Experimental Process Conditions

parameters	unit	run 1	run 2	run 3	run 4
		DHRF		HRF	
* influent concentration (C_0)	NTU	200	200	200	200
* filtration rate (V_f)	m/h	5	3	1	2
* media size (d_p) (mean 20)	mm	15 - 25	15 - 25	15 - 25	15 - 25
* filter length (L)	m	8	8	8	8
* rapid mixing time (t)	min.	1	1	-	-
* rapid mixing intensity (G)	s-1	200	200	-	-
* coagulant dose (Al^{3+})	mg/l	1	1	-	-

모식도이며, **Table 1**은 실험조건을 정리한 것이다.

일정한 수두를 가지는 탱크에서 원수는 유량계 (Model; 1305/-A1B3F000 from BROOKS)를 통해 카울린 (kaolin) 혼화 탱크로 유입되며, 유입된 원수는 연동 펌프에 의해 주입되는 카울린 슬러리와 혼화된다. 카울린은 통산 탁수 (turbid water)를 모사하기 위해 사용되는 물질이다. 모사된 탁수는 침전지 (L 0.5m × W 0.4m H 0.3m)에 유입되어 큰 입자들은 일차적으로 제거한다. 이 침전지의 월류율은 0.71m/h과 0.43m/h (각각의 여과속도는 5m/h 그리고 3m/h)로 운전된다. 침전지를 통과한 물은 균등조로 이송된다. 균등조에서는 200NTU의 탁도를 맞추기 위해 약간의 희석이 가능하도록 설비가 부가되어 있다. 혼화기를 이용하여 조내 수질이 일정하도록 유지하였다.

1차 침전을 거친 탁수는 응집제와의 혼화를 위해 혼화탱크로 유입되게 하였다. 혼화조건은 Wambulwa(1992)가 제시한 조건으로 하였는데, G값은 $100 \sim 300s^{-1}$ (평균 $200s^{-1}$), 최적 응집제 투입량은 $1mg Al_3^+ / l$, 그리고 혼화시간은 1분 정도로 하였다. 본 실험에서 응집제는 alum ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)를 사용하였다. 혼화에 의해 플록이 형성되기 시작한 원수는 horizontal-flow filter로 유입되었다. filter tube는 플라스틱으로 만들어져 있으며, 내부에 15~25mm 자갈로 충전되어 있다. 유효 여과 거리는 7.2m(4개의 필터; 각각의 길이는 1.8m)로 구성되어 있으며 각 필터의 연결관, 유입 및 유출부는 각각 0.2m에 달한다 (총 연장 8.0m).

여과거리에 따른 탁도 측정을 위한 샘플링 포트 (port)는 각각의 필터에 40cm마다 6개를 두었는데 필터 내부에 4개 각각의 유입과 유출부에 하나씩 두었다. 또한 각 필터에 3개 지점에 수두손실을 측정하기

위해 압력계를 장착하였다.

4. 모델 변수의 결정

2장에서 제시된 모델에서 각 변수(예; 체류시간의 상관계수)를 결정하기 위해, Bikaba(1991)의 실험 결과와 Wambulwa(1992)의 칼럼 침강 실험 결과를 이용하였다(Fig. 7 참조). 실험결과와 모델 예측치를 일치시키기 위해 각각의 모델 변수들을 실험결과와 trial & error 방법을 이용하여 구하였다. 그 결과 체류시간의 상관계수, K_T 의 표현식은 다음 식 (13)과 같이 도출되었다.

$$K_T = \beta \frac{\sqrt{V_f}}{H_s} \quad \text{식 (13)}$$

여기서 K_T 는 체류시간의 상관계수, β 는 모델 계수 (model coefficient), V_f 는 여과속도 그리고 H_s 는 칼럼 침전지의 깊이를 나타낸다. Fig. 7과 같이 실험결과와 모델 예측치가 잘 맞기 위해서는 β 값이 0.0576이 되어야 한다. 이에 식 (13)을 식 (12)에 대입하면 총 체류시간이 다음 식 (14)와 같이 도출된다.

$$T_s = \beta \cdot \sqrt{V_f} \cdot \frac{1 - \epsilon_0}{\epsilon_0} \cdot \frac{1}{d_g} \cdot \frac{\epsilon_0 \cdot L}{V_f} \quad \text{식 (14)}$$

식 (14)에서 마지막 항인 $\frac{\epsilon_0 \cdot L}{V_f}$ 는 여상에서의 수리학적 체류시간, T_G 를 나타냄에 따라 다음 식 (15)와 같이 정리할 수 있다.

$$T_s = K \cdot T_G \quad \text{식 (15)}$$

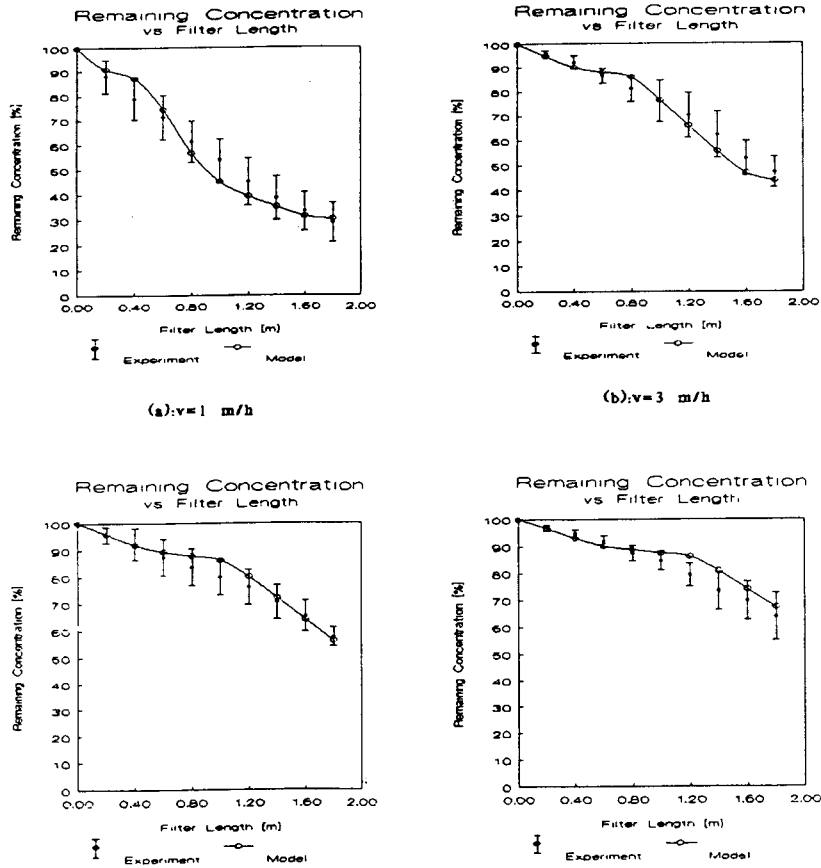


Fig. 7. Calibration of Model with Experimental Results of Bikaba(1991) ($C_0 = 200$ NTU, coagulant = $1.0 \text{ mg Al}^{3+}/\text{l}$, $H_s = 1.4 \text{ m}$, $\beta = 0.0576$, $d_g = 20 \text{ mm}$, $\epsilon_0 = 0.45$, $L = 1.8 \text{ m}$).

$$K = \beta \cdot \sqrt{V_f} \cdot \frac{1 - \epsilon_0}{\epsilon_0} \cdot \frac{1}{d_g}$$

만약 식 (15)에서 여재의 초기 공극률, ϵ_0 가 0.45, 유효 입경(mm), d_g 이 20mm, 그리고 β 가 0.0576일 때 체류시간의 총 상관계수, K는 3.52의 값을 가지게 된다. 즉, 칼럼 침전지의 체류시간은 자갈 여상 침전지의 체류시간의 K배가 되는 것이다. 또한 본 모델에서 K값의 물리적인 의미는 자갈 여상내에서 일어나는 응집 계수와 부가적인 특징을 포함하고 있다.

5. 실험 결과 및 모델의 검증

상기 4장에서 Bikaba(1991)의 실험 결과와 Wambulwa(1992)의 칼럼 침강 실험 결과를 이용하여

모델의 미지 변수 값을 결정하였다. 이에 Table 1에서 정리한 본 연구에서의 실험 결과(run 1~4)와 모델의 예측능을 비교·검토하였다. 표에서 제시한 바와 같이, run 1과 2는 DHRF에 대한 실험이고, run 3과 4는 HRF에 대한 실험이다. 각각의 실험들은 여재가 파과(breakthrough)될 때까지 수행하지 않았는데, 그 이유는 본 연구에서 제안된 모델은 여재가 제거능을 발휘할 때까지만 적용가능하기 때문이다.

다음 Fig. 8과 9는 본 연구에서 수행한 DHRF와 HRF의 실험결과와 모델의 예측값을 비교한 것이다. 예측시 모델의 변수는 4장에서 도출한 것과 같이 모델계수(β)는 0.0567, 컬럼 침전지의 깊이(H_s)는 1.4m, 유효 입경(d_g)는 20mm, 초기 여재 공극률(ϵ_0)은 0.45 등을 적용하였다. Fig. 8 및 9에서 실험결과와 통계학적으로 분산을 이용한 error bar로 표시하였

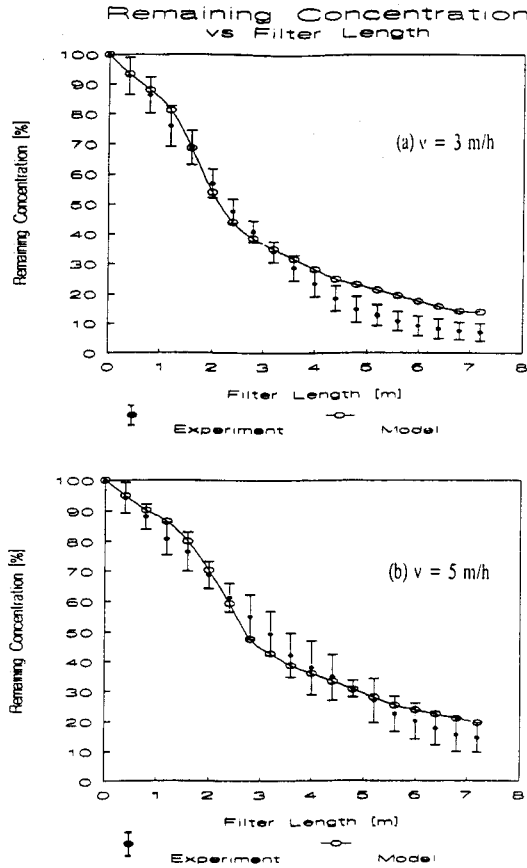


Fig. 8. Presentation of Results for Model and Experiment on Different Filtration Rates [DHRF]:(Model Parameters: $\beta = 0.0576$, $H_s = 1.4\text{m}$, $d_g = 20\text{mm}$, $\epsilon_o = 0.45$), (Process Conditions: influent turbidity, $C_o = 200$ NTU, coagulant dose= $1\text{ mg Al}^{3+}/\text{l}$, rapid mixing time, $t = 1\text{ min.}$, rapid mixing intensity, $G = 200\text{ s}^{-1}$).

다.

상기 Fig. 8에서 나타난 바와 같이, 전체 여과 거리에 대해 모델의 예측치가 실험결과와 잘 맞는 것을 알 수 있다. 그러나 (a) 3m/h의 여과 속도의 경우 여과 거리 4m 이후 실험결과와 예측치 사이에 편차가 발생되었다. 모델 예측치보다 높은 제거율을 보이는 것은 침전 메커니즘뿐만 아니라 여과 메커니즘이 작용하는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 이러한 효율 증진 효과는 여과지 말단에서도 최종 제거율의 약 10% 미만을 차지한다. 한편 (b) 5m/h의 여과 속도의 경우, 모델의 예측치는 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

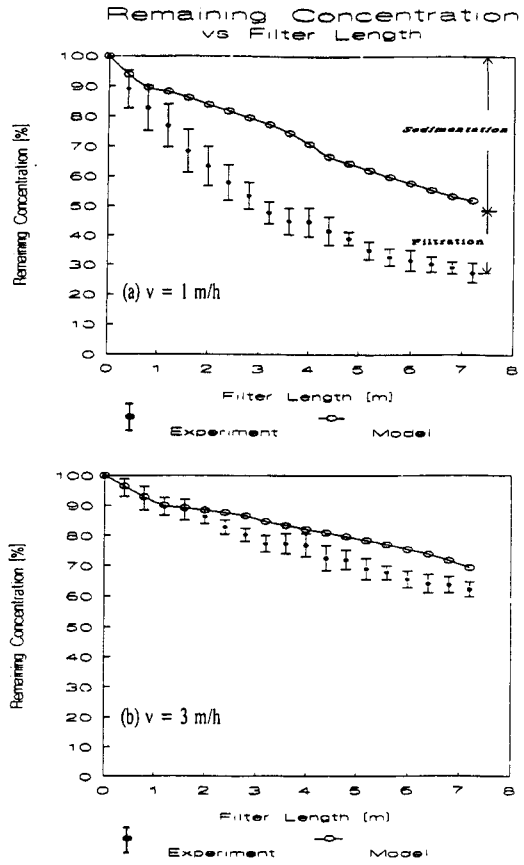


Fig. 9. Presentation of Results for Model and Experiment on Different Filtration Rates [HRF]:(Model Parameters: $\beta = 0.0576$, $H_s = 1.4\text{m}$, $d_g = 20\text{mm}$, $\epsilon_o = 0.45$), (Process Conditions: influent turbidity, $C_o = 200$ NTU).

또한 Fig. 8에서 (a) 및 (b)의 여과속도에서 모두, 여과 거리 3~4m에서 상대적으로 가파른 입자 농도의 저하가 나타났다. 이러한 가파른 농도의 저하 이후는 여과 거리 7.2m까지 심한 감소가 나타나지 않았다. 이러한 현상은 DHRF에서 주된 제거 기작은 Camp (1946)와 Huisman(1986)이 제안한 침전 메커니즘에 의해 일어남을 보여주는 것이다. 또한 그들은 플록의 침전에 대해 플록의 성장을 방해하는 전단력(shearing force)에 의해 “제한 플록 크기(limiting floc size)”가 존재함을 역설하였다.

상기 Fig. 9에서 나타나듯이, HRF의 경우에는 본 연구에서 제안한 DHRF모델 예측치가 여과 속도 1 m/h (a)에서의 실험결과와 잘 맞지 않는 것을 볼 수 있다. 7.2m의 여과 거리 말단에서는 모델 예측치에

비해 35% 정도 낮은 농도가 관측되었다. 그러나 여과속도가 3m/h (b)의 경우에는 본 연구에서 제안한 모델이 (a)에 비해 무리 없이 실험 결과를 예측하는 것으로 나타났다. (a)의 경우, 모델 예측치와 실험 결과가 잘 맞지 않는 것은 응집제 사용을 통한 플록의 전기·화학적인 물성이 변함 때문인 것 같다. 이는 DHRF공정 내에서는 입자들은 상대적으로 HRF공정 내 입자보다 크기 때문에 침전 메커니즘이 지배할 뿐만 아니라 여재의 표면에 침전되어 형성된 플록이 흐름에 따라 흘러가는 탁질 입자를 제거하는 interception 작용이 가중되어 입자제거효율에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 DHRF 및 HRF 과일릿 규모의 실험 결과를 토대로 여재 거리에 따른 수질을 쉽게 예측하는 개념적이고 수학적인 모델을 개발하고자 하였다. 또한 본 모델을 이용하여 DHRF를 최적화시키기 위해 모델 인자 결정을 할 수 있는 방법론을 제시하고자 하였다. 연구를 수행하는 동안 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1) 본 연구에서는 DHRF내 조립 여상에서의 탁질 제거의 기작을 다중 판상 침전지내 거동과 유사한 모델을 적용하여 설명함으로써 여과거리에 대한 수질을 만족스럽게 예측하였다.

2) 기존 칼럼 침강 실험은 각기 다른 원수 수질에 대한 DHRF내 조립 여상에서의 탁도 제거 기작의 모델 변수를 결정하는데 편리하고 유용하였다. 그 예로 본 연구에서는 모델계수(β)는 0.0567, 컬럼 침전지의 깊이(H_c)는 1.4m, 유효 입경(d_g)는 20mm, 초기 여재 공극률(ϵ_0)은 0.45 등을 도출하였는데, Bikaba(1991)의 실험 결과와 Wambulwa(1992)의 침강성 실험결과를 통해 검증해본 결과 부합성이 높은 것으로 나타났

다.

3) 본 연구에서 제안한 모델 예측치와 수행한 실험 결과를 통해 모델을 검증한 결과, DHRF공정 내에서는 입자들이 상대적으로 크기 때문에, 입자제거효율에 침전 메커니즘이 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

참고문헌

- Ahn, H.W. (1992) "Modeling of Particle Removal in the First Coarse Media of Direct Horizontal-Flow Roughing Filtration", M.sc. Thesis Report, IHE, Delft, Netherlands.
- Ahsan, T., Alaerts, G.J.F.R. & Buiteman, J.P. (1991) "Direct horizontal-flow roughing filtration; An improved pretreatment process for highly turbid water", Proc. of the Filtration Society Conference, Karlsruhe-Germany, Oct.
- Bikaba, D. (1991) "Direct horizontal-flow roughing filtration; Study of turbidity removal mechanisms and design parameters for optimum length", M. Sc Thesis, IHE, Delft, Netherlands.
- Camp, T.R. (1946) "Sedimentation and the design of settling tanks", Transactions, ASCE, Vol. III, No. 2285, pp. 895-958.
- IWACO, Adviesbureau voor water en milieu, (1990) "The application of horizontal-flow roughing filter (HRF) as pretreatment for slow sand filtration -A case study in Desa Plumbon, Indonesia; Rotterdam, Netherlands.
- Huisman, L. (1986) "Sedimentation and Floatation, Lecture Note, IHE, Delft, Netherlands.
- Wambulwa, P.S. (1992) "Study on the influence of rapid mixing on the performance of direct horizontal-flow roughing filtration", M. Sc. Thesis, EE60, IHE, Delft, Netherlands.
- Wegelin, M., Boller, M. & Scherlender (1987) "Particle removal by horizontal-flow roughing filtration", *Journal of water supply science & technology-AQUA*, No. 2, pp. 80-90.
- Yao, K.M. (1969) "Theoretical study of high-rate sedimentation, Annual conference of the water pollution control federation, Dallas, Texas, act.