

여과초기에서의 탈착된 입자의 거동

Role of Detached Particles During Initial Filtration Phase

김자겸¹ · John E. Tobiason²

Kim, Ja-Kyum^{1,*} · John E. Tobiason²

1 한국수자원공사 수도관리처

2 University of Massachusetts, Amherst (USA)

(2004년 9월 12일 논문 접수; 2004년 12월 10일 최종 수정논문 채택)

Abstract

Mathematical model was developed to verify a sequential particle removal taking place in a granular media gravity filter. Consequential multi-layer filtration cycle model was applied to verify the fraction of filter effluent particles that are filter influent particles that were never removed as well as the fraction of filter effluent particles that were detached after deposition were performed through laboratory experiments. Three sizes of marker particles were injected ahead of the filter column as a pulse in the presence of four sizes of polystyrene particles that were used as a primary source of particles in the raw suspension to investigate particle attachment alone in contrast to net removal from attachment and detachment. Microscopic counting of filter effluent particles was assumed to reflect attachment. Experimental results indicated that particle detachment is significant beginning from the early phase of filtration. For each size of fluorescent microspheres at one filter depth, fluorescent microsphere removal increased with filter runtime to a maximum due to ripening. The detached fraction of effluent particles increased with particle size and filter depth. The presence of detached particles and the increasing fraction of detached particles in deeper bed were confirmed.

Key words: attachment of particle, detachment of particle, fluorescence, single collector efficiency

주제어: 부착입자, 탈착입자, 형광성, 단일집적효율

1. 서 론

현재 여과이론은 크게 3가지로 대별될 수 있다. 그

중 가장 오래되고 대표적으로 많이 사용되었던 이론은 현상학적인 해석(phenomenological theory)으로서 1937년 Iwasaki가 경험적인 인자의 조합으로 다음 식(1)과 같이 편미분 방정식을 사용하여 여과효율을 간

*Corresponding author Tel : +82-42-629-2808, FAX : +82-42-629-2849, E-mail : jakyum@kowaco.or.kr (Kim, J.K.)

단하게 표현하였다. 현상학적인 해석은 이후 다른 연구자에 의하여 이 모델의 결점을 보완하려는 노력이 계속되었다(Ives, 1967; Mintz, 1966). 하지만 현상학적인 해석은 각 인자를 실험에 의하여 구해야 하며, 한 여과지에서 구한 인자는 다른 여과지나 다른 원수 및 약품을 사용하는 경우에는 정확한 결과를 보여줄 수 없어 조건이 바뀌는 경우에는 필요한 인자를 다시 실험을 통하여 구해야 하므로 사용에 한계가 있다. 그리고 현상학적인 해석은 유입수와 유출수질 및 여과지 깊이만이 변수이기 때문에 여과중 발생하는 기작의 이해없이 해석되므로 근본적인 의문은 계속 남게 된다.

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\lambda C \quad (1)$$

여기서 C: 농도, z = 여상 깊이, λ = 여과계수

이러한 단점을 해소하기 위하여 도입된 해석이 궤도해석(trajjectory analysis)으로서 여재를 가진 여과지에서 여재에 의한 입자의 제거는 두 가지 작용에 의한 것으로서, 첫 번째 물속의 입자가 여재에 의하여 제거될 수 있는 거리에 가까이 다가가는 운반과정과, 두 번째는 가까이 다가간 입자가 어떠한 작용에 의하여 여재에 붙는 부착과정으로 표현되는 해석이다. Yao et al.(1971)은 공기여과이론의 기본개념을 물여과에 도입하였던 O'Melia and Stumm(1967)의 이론적인 바탕을 기초로 하여 최초로 입자의 운반에 대한 이론적인 해석과 실험을 통한 이론의 정당성을 발표하였다. Yao et al.(1971)은 실험결과에서 여재에 의한 입자의 제거율은 브라운운동(Brownian motion), 차단(interception)과 침강(sedimentation)이며, 최소의 제거율은 작은 입자가 아니라 1-2μm 크기의 입자이며, 입자가 이 보다 작을수록, 그리고 클수록 제거율은 높아지는 것을 이론적인 해석과 실험적인 결과를 통하여 보여주었다. 하지만 Yao et al.(1971)은 주로 운반기작에 대한 해석을 위주로 하였다. 그 이유는 응집제를 적절히 주입한 경우에는 유입된 입자는 전부 여재에 부착한다는 전제를 가정으로 사용하였기 때문이다. 하지만 현실에서는 응집제를 적절히 주입한다고 해서 항상 부착률이 100%가 되는 것은 아니며,

입자가 가까이 다가가면 갈수록 발생하는 수리학적지체(hydrodynamic retardation)효과 때문에 여과초기에서 정확한 입자의 제거율을 예측할 수는 없었다. 이러한 약점을 Rajagopalan and Tien(1976)은 입자의 상호작용에서 중요한 위치는 차지하는 London van der Waals 인력과 수리학적지체효과를 포함하여 여과초기 입자제거율에 대한 식을 발표하였다.

$$\frac{C}{C_o} = \exp\left(\frac{-3(1-\epsilon)}{2d_c} \eta_o \alpha L\right) \quad (2)$$

여기서 C: 여과수 탁질농도, C_o: 유입수 탁질농도, ε = 공극비, d_c = 여재의 입경, α: 부착계수, L: 여상의 깊이, 여기서 η_o는 단위여재에 의한 탁질입자 제거율로서 Yao et al.(1971)은 아래 식 (3)과 같이 열역학적인 브라운운동에 의한 제거효율과 차단(Interception) 및 침강에 의한 제거효율의 합으로 표현하였다. 각 기작에 의한 제거율의 자세한 설명은 Yao et al.(1971)과 Kim(2003)의 논문을 참조한다.

$$\eta_o = \eta_D + \eta_i + \eta_G \quad (3)$$

$$\eta_o = 4A_S^{1/3} N_{Pe}^{-2/3} + 3.38 \times 10^{-3} \times A_S N_G^{1.2} N_R^{-0.4} + A_S N_{LO}^{1/8} N_R^{15/8} \quad (4)$$

여기서 각 계수에 대한 자세한 설명은 Rajagopalan and Tien(1976)과 Kim(2003)의 논문을 참조한다.

하지만 이러한 궤도해석적인 접근은 여과과정중에서 발생하는 입자 운반 및 제거기작에 대하여는 잘 알려주지만 결과의 정확성은 단지 여재가 아주 깨끗한 상태(clean bed removal)에서만 가능하다는 단점이 있다. 즉, 탁질입자가 여재 표면에 의하여 제거되는 현상만을 해석할 수 있기 때문에 여재 표면에 일단 입자가 부착이 되어 필름을 형성한 상태에서는 여재 표면에 의한 제거보다는 여재 표면에 부착된 탁질 입자에 의한 제거인 숙성단계 이므로 정확한 제거율을 기대할 수 없다. 또한 여재의 표면에 의한 입자제거 시간은 유입수 농도에 따라 다르지만 일반적으로 매우 짧은 시간에 이루어지므로 오랜 시간동안 운전되는 여과지에서의 제거효율을 정확히 표현하기에는 부

적절하다. 따라서 과도해석은 실제 여과공정에서의 제거율보다는 입자제거 기작을 보여주고 기본적인 제거이론에 대한 이해를 높여 다음 단계의 발전을 위한 기초라고 할 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 제시된 이론이 아래 식 (5)로 표현되는 1978년에 O'Melia and Ali가 발표한 숙성이론(ripening theory)으로서 여과주기해석(filtration cycle model)의 시작이라고 할 수 있다. 이 식이 나타내는 의미는 숙성에 의한 탁질 입자 제거율은 여재 표면에 의한 제거율과 여재에 이미 부착된 입자가 여재의 역할을 함으로써 발현되는 탁질 입자 제거율의 합이라고 할 수 있다.

$$\eta_r = \alpha n_b + N\alpha_p \eta_p \left(\frac{d_p}{d_c}\right)^2 \quad (5)$$

하지만 위의 식(5)의 숙성모델은 일반 여과지에서 나타나는 파과(breakthrough)현상을 설명할 수 없다. 따라서 이에 대한 보완을 위하여 여러 연구자들이 O'Meli and Ali(1978)의 숙성모델을 개선하여 실제의 현상에 가깝게 예측하기 위한 다양한 보완 작업을 시도 하였다 (Vigneswaran and Tulachan, 1988; Vigneswaran and Chang, 1989; Tobiasson and Vigneswaran, 1994).

그러나 이후 보완된 모델들도 여과지에서 발생하는 현상을 충분히 설명할 수는 없었다. 그 이유는 각각의 층으로 이루어진 여과지를 하나의 통으로 보았으며, 또한 모델에 탈착에 의한 영향을 적절히 표현하지 못하였기 때문이다. 이를 보완하기 위하여 Kim (2003)은 연속적 다중층 여과주기모델(consequential multi-layer filtration cycle model)을 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 제시하였다.

이 모델은 여과지를 한 개의 큰 통으로 보기보다는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 각 각의 층이 부착과 탈착을 반복하는 얇은 층의 조합으로 가정하였다. 또한 각 층의 여과수내의 탁질 입자의 성질은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 해당 층에서 떨어진 입자와 전 층에서 왔지만 해당 층에서 제거되지 않은 탁질 입자로 나눌 수 있다. 해당 층에서 제거되지 않은 탁질 입자는 다시 유입수에 있던 입자중에서 한번도 여과를 경험하지 못하였던 입자와 한번 이상 부착된 경험이 있지만 떨어진 탁질 입자로 나눌 수 있다. 따라서 각 층

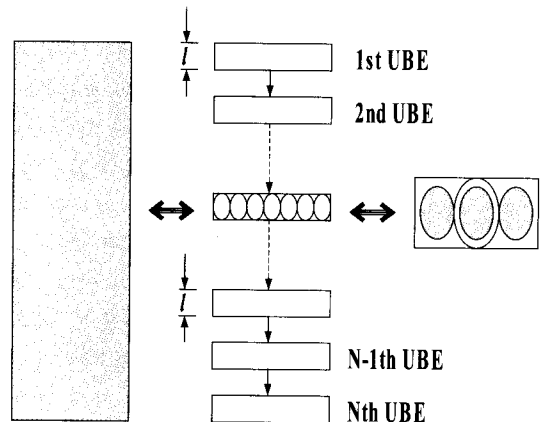


Fig. 1. 연속적 다중층 여과주기모델의 기본 개념도.

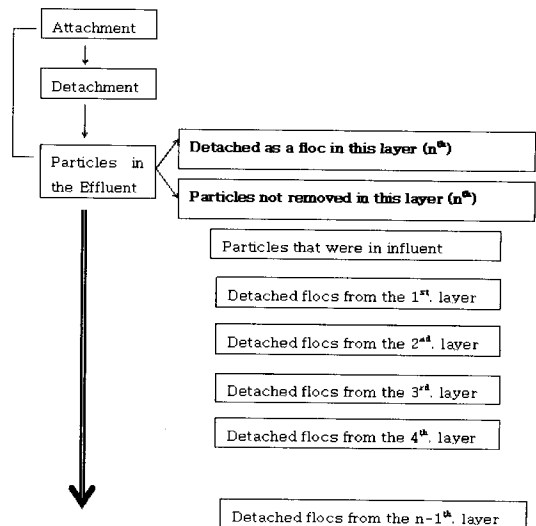


Fig. 2. 여과수내 탁질입자의 구성.

에 유입되는 탁질의 갯수를 성질에 따라 표현하면 식 (6)에서 보는 바와 같이 여상에 유입된 탁질 입자중에서 아직까지 여재에 걸려본 적이 없는 입자(첫 번째 항)와 한번 부착되었지만 어떠한 원인에 의하여 떨어진 탈착 경험 입자(두 번째 항), 그리고 해당 층에서 떨어진 입자(세 번째 항)로 구성되어 있다고 가정하였다. i 번째 단위여상층에서의 탁질입자의 개수에 대한 일반적인 표현은 다음 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$n_i = n_{i,NR} + n_{i,DT} = n_{i,NR1} + n_{i,DT1} + n_{i,DT2} \sim + n_{i,DTi-1} + n_{i,DTi}$$

$$\begin{aligned}
 &= n_0 \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{3(1-\varepsilon_i)}{2d_c} I\eta_{inf,i} \right) \\
 &+ \sum_{i=1}^{n-1} K_{d,i} \prod_{m=i}^{n-1} \left(1 - \frac{3(1-\varepsilon_{m+1})}{2d_c} I\eta_{det,m+1} \right) \\
 &+ K_{dn} (\sigma_0 = 0)
 \end{aligned}$$

이후 논의되는 여과초기에 대한 현상에 대한 실험 결과 및 설명은 최초 깨끗한 여재상태 여과(clean bed removal)과 숙성단계(ripening)까지 포함한다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 혼화, 응집 및 여과 공정을 가진 직접여과방식의 실험실규모 장치이며 폴리스티렌입자를 사용하였다. 여과 컬럼은 직경 25mm의 유리 컬럼으로서, 깊이는 17mm(얇은 여상), 34mm(기준 여상)와 68mm(깊은 여상)이며 여재는 0.52mm 모래이다. 원수의 탁질 입자 농도는 5mg/L로서 일반적인 원수의 탁질 입자구성과 유사하도록 0.2, 1.2, 2.5, 4.0 μ m 등 4가지 크기의 폴리스티렌입자를 5 × 10⁻⁵M NaHCO₃의 초순수에서 혼합하여 제조하였다. 원수탱크에서 펌핑된 입자들은 0.04 M CaCl₂와 in-line static mixer에서 혼화되어 불안정화시킨 후, 프로펠러 타입의 응집지에서 20분 동안 응집과정을 거친 후 여과 컬럼으로 자연낙하로 유입되었다. 이때의 여과속도는 7.3m/hr(180m/일)이었다. 여과수의 탁도는 Manual Flow Cell Kits(Hach)와 2100N 탁상용 탁도계(Hach)를 이용하여 연속적으로 측정하였다. 수중입자분석을 위하여 주기적으로 샘플을 채취하였으며 측정범위는 1-300 μ m로서 광차단센서를 사용하는 입자분석기(LB1010 MetOne & WGS 260 Batch Analyzer Software)를 측정에 사용하였다. 여과중에 발생하는 손실수두도 유입과 유출구에 설치된 마노미터를 사용하여 여과기간 동안 측정하였다.

유입된 탁질 입자중에서 여과 컬럼의 수리적 체류 시간동안 제거되지 않고 여과수로 유출된 탁질입자의 비와 같은 기간에 부착되었다가 탈착된 탁질 입자의 비는 세 가지 크기의 녹색형광입자를(1.4, 4.0, 9.0 μ m) pulse 형태의 주입을 통하여 얻어진 결과를

이용하여 결정하였다. 형광입자(fluorescent microsphere(FM))들은 여재에 닿기 전에 서로 뭉치는 것을 방지하기 위하여 주사기펌프와 0.8mm관을 이용하여 여재 표면상 2.5cm에 주입하였다. 채집한 여과수에 포함된 형광입자는 25mm PCTE 흑색여과지를 사용하여 샘플을 만든 후 형광현미경(Olympus Model BH2-RFL)을 사용하여 직접 입자수를 세었다. 유입된 탁질 입자중 여과 컬럼의 수리학적체류시간 동안에 제거되지 못하고 여상을 통과한 입자와 여과수에서 채집된 형광입자는 동일한 여재에 대하여 여과성향이 같다고 가정하였다. 그 이유는 두 종류의 입자가 제조회사, 크기, 표면화학적 성질등 모든 물리적, 전기적 성질이 동일하고 단지 하나 다른 것은 형광색을 나타낸다는 점이다. 따라서 동일한 크기의 입자에 대하여 (여과수에서 채집된 형광입자수/Pulse 형태로 주입된 전체 형광입자수) = (여과수 내의 일반 입자수/유입수내의 일반입자수)의 관계를 가진다고 할 수 있다. 또한 여과수내의 입자구성이 여과지에서 제거하지 못하고 유출된 입자와 탈착된 입자등 두 가지 종류로 형성되어 있다는 가정이 적절하다면, 특정한 크기의 입자에 대하여 탈착된 입자수는 여과수내의 전체 입자수에서 여과지가 제거하지 못한 입자수를 빼는 것으로 생각할 수 있다. 각 여상 깊이에 대하여 최초 깨끗한 여재상태 여과(clean bed removal) 실험은 각 깊이에 대하여 1회씩 수행하였고, 숙성단계에 대한 실험은 실험시간 120분, 3회씩 수행하였으며 제시된 결과는 3회 실험결과의 평균을 사용한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 최초 여과상태의 입자 제거

최초 여과상태에서의 입자 제거 효율은 양호한 화학적 조건하에서 여재의 물리적인 성질과 입자의 크기에 따라 결정된다. 이 시기에는 입자가 여재의 표면에 부착되어 제거되기 때문에 가장 정확한 제거율을 알 수 있다. 따라서 동일한 입자에 대한 제거율은 단위 체적당 여재의 표면적에 따라 결정된다. Fig. 3은 여상 깊이 3.4cm의 기준여상에서 최초 여과상태(clean bed)를 형성한 후, 세 가지의 형광 입자에 대하여 단독여재 입자집적효율(single collector efficiency)

을 형광 입자 제거율에서 구한 것과 이론적인 계산값을 같이 표현한 그림이다. 이론 값의 계산은 위의 식 (3) (Rajagopalan and Tien, 1976)을 이용하여 도출하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 1.4 μm 의 형광입자는 이론값과 같은 값을 나타내어 수행된 실험의 신뢰성을 부여하였다. 하지만 4.0 μm 과 9 μm 의 형광입자는 이론 값보다 높게 나타났다. 이러한 현상은 이 연구에서뿐만 아니라 Yao(1968) and Ghosh *et. al.* (1975)의 실험에서도 같은 경향을 보였다. 이러한 경향은 Rajagopalan and Tien(1976) 모델(RT 모델)이 차단에서나 침강 기작에 의하여 제거되는 효율을 과소 평가한 결과로 판단된다. 왜냐하면 RT모델에서 입자의 크기에 영향을 받는 기작은 차단과 침강이기 때문이다.

3.2. 숙성단계에서의 탁도 및 입자수의 변화

여과지에서 숙성단계에서는 여재에 부착된 입자나 또 다른 여재의 역할을 수행한다(O'Melia and Ali, 1978). 일반적으로 여과지에서 빠른 시간에 여과효율이 상승하는 이유는 바로 이러한 숙성기작에 의한 것으로 단순히 여재 표면에 의한 여과효율보다 훨씬 높은 상태를 보여준다.

Fig. 4는 숙성기간 중 얇은 여상과 깊은 여상에서의 탁도와 총 입자(1-300 μm)에 대하여 잔류율을 나타낸 그림이다. Fig. 4는 깊은 여상에서 잔류율이 얇은 여상보다 낮게 보여줄 뿐만 아니라 시간이 지나면서 잔류율이 줄어드는 경향을 보여주어 수행된 실험

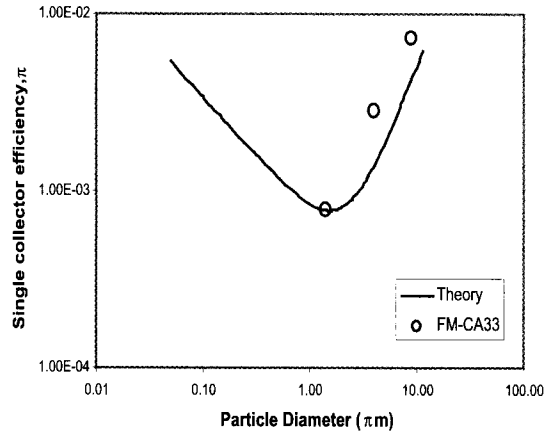
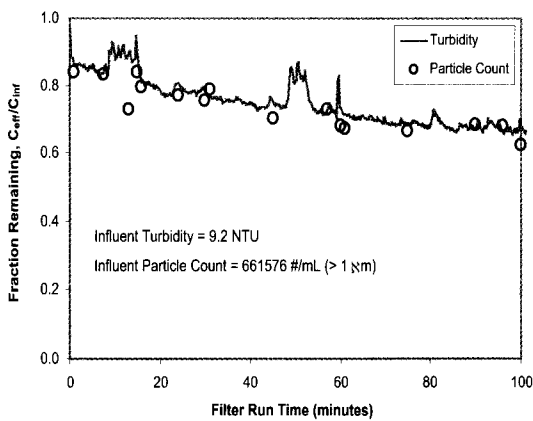


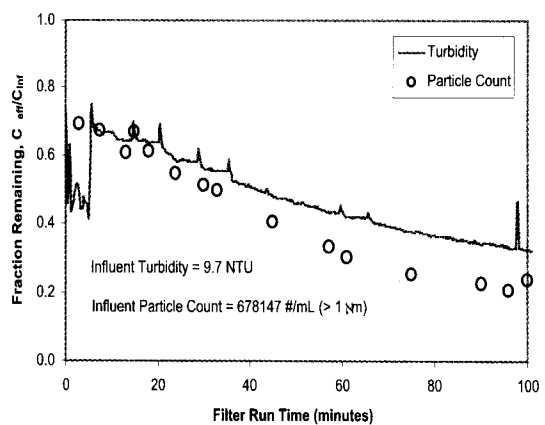
Fig. 3. 3가지 형광입자에 대한 단독여재 집적율.

의 결과가 일반적인 여과이론에 충실치 따른다는 것을 보여준다. 하지만 깊은 여상(Fig. 4(b))의 여과초기에서 나타난 급격한 잔류율의 상승은 어떠한 현상이 발생하였다는 것을 시사한다.

Fig. 5는 숙성기간중 여상의 깊이에 따라 작은 입자(1~2 μm)와 큰 입자(6~12 μm)에 대하여 잔류율의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 작은 입자는 여과가 진행에 따른 잔류율의 변화가 거의 없고 여과가 진행됨에 따라 잔류율이 저하되는 전형적인 여과현상을 보여주는 반면, Fig. 5(b)의 큰 입자는 심한 변화와 함께 여과의 진행과 함께 잔류율이 상승하여 일반적인 여과현상과는 전혀 다른 경향을 보여준다. 이러한 비 정상적인 현상은 Fig. 4(b)의 초기 탁도 상승 현상과 함께 보다 정밀한 해석이 필



(a)



(b)

Fig. 4. 숙성기간중 탁도와 입자의 변화((a) 얇은 여상(17mm), (b) 깊은 여상(68mm)).

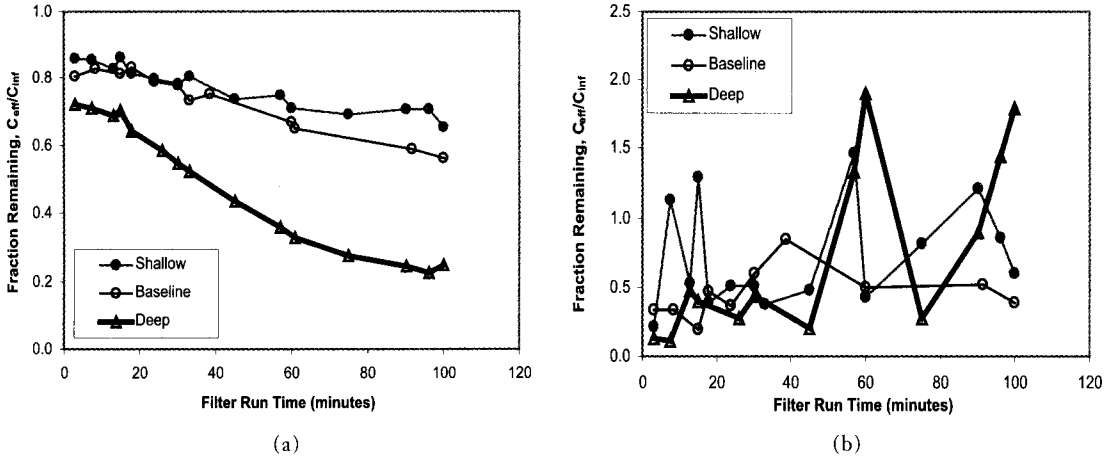


Fig. 5. 깊이에 따른 입자수 변화((a) 작은 입자(1~2 μm), (b) 큰 입자(6~12 μm)).

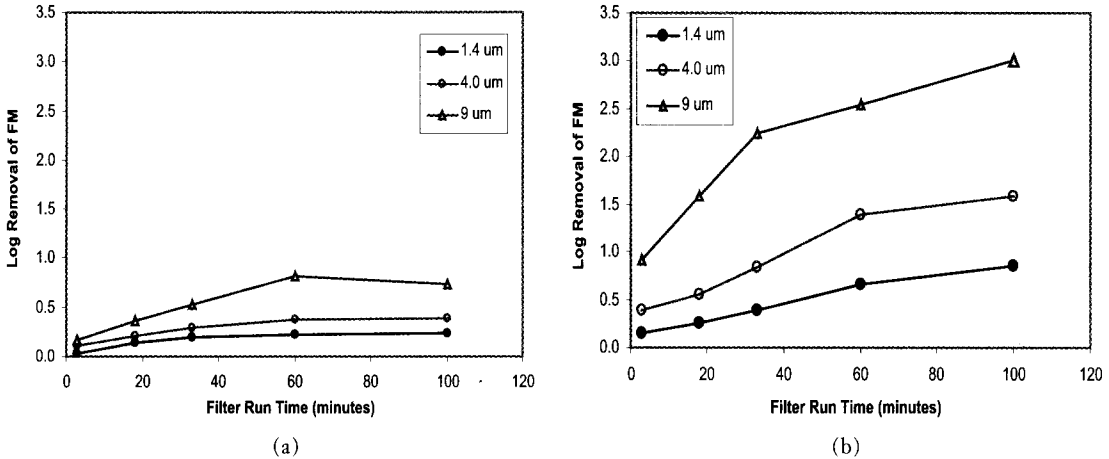


Fig. 6. 여과시간에 따른 FM 제거율((a) 얇은 여상(17mm), (b) 깊은 여상(68mm)).

요하다는 것을 알려준다.

3.3. 숙성단계에서의 형광입자(FM) 제거율의 변화

Fig. 6은 숙성단계에서 주입된 형광입자(FM)의 제거율을 각 깊이에 따라 입자 크기별로 비교할 수 있도록 표현한 그림이다. 앞에서 논의한 바와 같이 여과수에서 채집한 형광입자는 여과경험이 없는 입자로 판단할 수 있다. 즉 유입수에 주입되어 여상을 통과하는 동안 한번도 여체에 부착되지 않고 그냥 빠져나온 입자로 본다. 그 이유는 여과 시료를 채집하는 시간동안에는 탈착된 입자가 거의 발견되지 않았기 때문이다(Kim(2003); Kim and Tobiason(2003)).

Fig. 6에서 보는 바와 같이 형광입자의 제거율은 여

상의 깊이가 깊을수록, 그리고 입자가 클수록 높게 나타났으며, 여과가 진행됨에 따라 형광입자의 제거율이 높게 나타나 이 실험의 결과가 기본적인 여과이론에 충실히 부응하고 있다는 것을 보여 준다. 작은 입자(Fig. 6의 1.4 μm 와 Fig. 5의 (a))들은 두 그림에서 비슷한 경향을 보여준다. 즉, 여상이 깊으면 높은 제거율을 보여줄 뿐만 아니라 여과가 진행되면서 제거율이 상승하는 기본적인 여과 경향을 같이 보여준다. 이에 반하여 큰 입자는 두 그림에서 전혀 상반된 경향을 보여준다. Fig. 6에서는 여과가 진행됨에 따라 입자에 대한 제거율이 상승하지만 Fig. 5(b)에서는 여과의 진행과 관계없이 처음부터 혼란된 상태를 보여준다. 형광입자의 거동이 여상에서 제거되지 않은

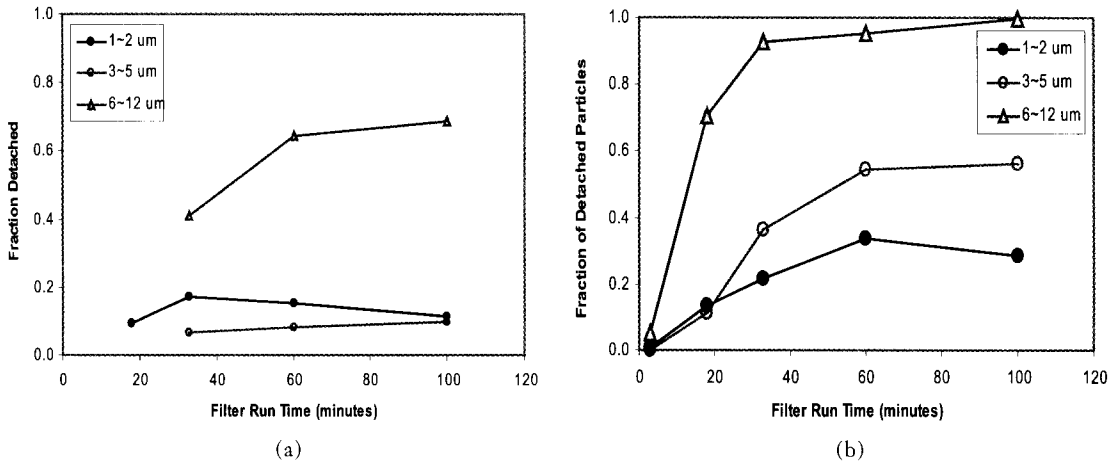


Fig. 7. 여과시간에 따른 입자의 탈착율((a) 얇은 여상(17mm), (b) 깊은 여상(68mm))

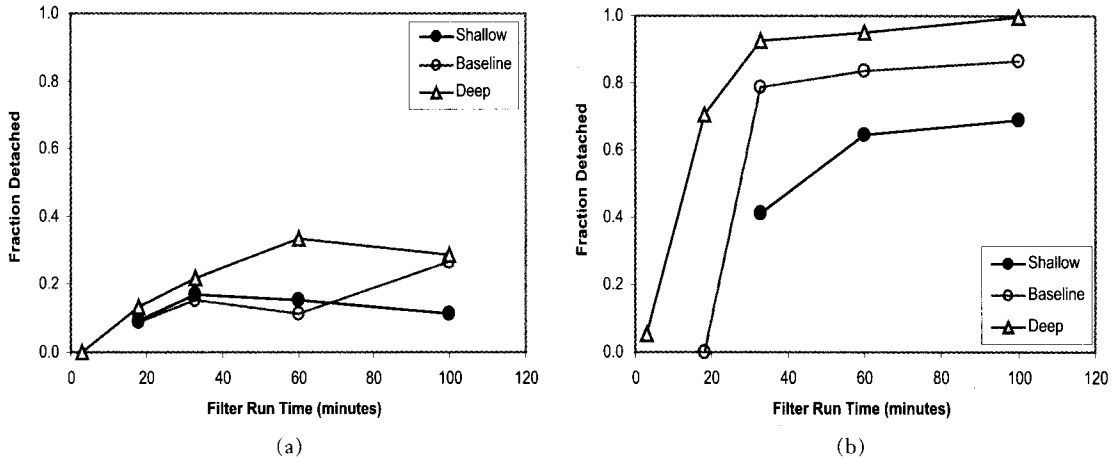


Fig. 8. 여과시간에 따른 입자의 탈착율((a) 작은 입자(1~2μm), (b) 큰 입자(6~12μm))

입자를 대표할 수 있다고 가정할 때, 이러한 상반된 경향에서 큰 입자의 경우에는 여상의 깊이와 관계없이 어떠한 다른 성질의 입자가 여과 초기부터 여과수에 누출되고 있다는 결론을 얻을 수 있다. 이 연구에서 다른 성질의 입자는 외부에서 수입되는 입자가 없기 때문에 탈착된 입자라는 것을 알 수 있다.

3.4. 속성단계에서의 탈착율의 변화

Fig. 7은 여과의 진행에 따라 변화하는 입자의 탈착율을 각 입자의 크기 범위에 따라 얇은 여상(a)과 깊은 여상(b)에서 나타나는 결과를 보여준다. Fig. 7에서 보여주는 결과는 탈착율은 입자가 크면 클수록 높다는 것과 일반적으로 여과가 진행되면서 탈착율도

상승하는 경향을 보여준다. 또한 입자의 탈착이 여과 초기부터 발생한다는 사실과 여상의 깊이가 깊을수록 탈착율이 높다는 것을 Fig. 8을 통하여 분명하게 보여준다. 하지만 작은 입자는 여상의 깊이가 깊어도 큰 차이를 보여주지 않아 작은 입자는 수류전단력에 의한 영향이 적어 탈착이 덜 된다는 과거의 연구결과와 같은 경향을 보여준다(Bai and Tien, 1997). 이와 같이 Fig. 7과 Fig. 8은 탈착된 탁질 입자의 전체 여과수입자에 대한 비율이 여상의 깊이, 여과지속시간 및 탁질 입자의 크기와 밀접한 관계를 가진다는 것을 요약하여 보여준다. Fig. 7(b)는 깊은 여상(68mm)에서 탈착입자 비율은 1~2μm 범위의 입자가 0%에서 30%를 보인 반면, 6~12μm 범위의 입자는 탈착입자

비율이 33분 이후에는 여과과정에 걸쳐 90% 이상을 나타내 보였다. 위의 결과를 놓고 볼 때, 여과지속시간 40분 이후에서 깊은 여상의 여과수내의 6 μ m 이상의 입자는 대부분 탈착입자라는 것을 알 수 있다. 또한 여상의 깊이에 따라 탈착입자비율이 증가되는 경향을 감안하면 60cm 이상의 여상 깊이를 가진 실제 정수장의 여과수에서 발견되는 큰 입자들은 대부분이 여과지의 수리학적 체류시간전에 유입된 탁질입자가 미세거되어 유출된 것보다는 여상에서 한번 부착되었다가 떨어진 탁질 입자라는 것은 말해준다.

4. 결론

제안된 모델에 따라 결과를 검증하기 위하여 수행된 실험결과를 통하여 최초 여과상태에서의 여과효율과 숙성기간중에 탁질 입자의 크기와 여상의 깊이가 여과효율에 미치는 영향을 확인하였다. 실험결과에 따르면 이론적인 검증을 위하여 수행된 최초 여과상태에서의 형광입자를 이용한 여과효율 실험에서 본 실험이 여과이론과 부합되는 경향을 도출함으로써 실험 방법 및 절차의 정당성을 나타내었으며, 여과지에서 형광입자 제거율(입자의 집적율)은 형광입자의 크기와 여상의 깊이가 증가할수록 커진다는 것을 보여준다.

탈착이 여과수내 입자의 구성에 미치는 영향은 여과초기부터 상당한 정도로 진행되었다. 실험에 사용된 입자의 범위인 1~12 μ m에서 탈착된 입자가 여과수내의 입자구성에 차지하는 비율은 형광입자의 크기가 커 질수록, 그리고 여과지의 깊이가 깊어질수록 증가되었다. 또한 입자의 탈착은 여과 초기부터 시작되어 과거의 탈착에 대한 일반적인 관념을 흔들여 놓았다. 이러한 경향은 과거의 여과에 대한 고정관념과 배치되는 결과이다. 과거에는 정상여과(steady-state filtration) 기간중에는 탁질의 누출이 없으며 다만 여과 말기에 발생하는 파과만이 탈착에 의한 결과라는 것이 일반적인 신념이었다. 하지만 계측기기의 발달으로 인하여 밝혀지는 여과의 여러 가지 현상은 우리의 여과지 설계 및 운영에 대한 접근방법을 과거와는 다르게 해야 한다는 것을 시사한다. 과거에 수행된 연구성과에 따르면 동일한 여과지에서 *Giardia*의 제거율이 비슷한 크기의 입자제거율에 비하여 훨씬 높

은 것을 보여주는데(Nieminski and Ongerth, 1975; Swertfeger *et. al*, 1999). 본 연구에 따르면 두 제거율의 차이가 개별적인 입자(형광입자)의 제거율과 대부분의 정수처리공정에서 볼 수 있는 것으로서 여러 형태의 입자가 응집되어 있는 플락의 제거율의 차이에서 발생할 수 있다는 것을 보여준다.

참고문헌

- Bai, R., Tien, C. (1997) "Particle Detachment in Deep Bed Filtration," *J. Colloid and Interface Sci.*, **186**, pp. 307-317.
- Ghosh, M.M., Jordan, T.A., and Porter, R.A. (1975) "Physicochemical Approach to Water and Wastewater Filtration," *J. Envir. Eng. Div. in ASCE*, **101**, pp. 71.
- Ives, K.J. (1967) Basic Concepts of Filtration, Proceedings from the *Society for Water Treatment and Examination*, **16**, pp. 147-169.
- Iwasaki, T. (1937) "Some notes on Sand Filtration," *JAWWA*, **29**(10), pp. 1951.
- Kim, J. (2003) "Particles in Filter Effluent: Exploring The Roles of Deposition and Detachment," Doctoral Dissertation, University of Massachusetts, Amherst, MA.
- Kim, J. and Tobiason, J.E. (2003) Particles in Filter Effluent: The Roles of Deposition and Detachment, submitted to *Environ. Sci. Technol.*
- Mintz, D. M. (1966) "Modern Theory of Filtration," Special Subject No. 10, Int. Wat. Supply Assoc. Congress, Barcelona, Spain.
- Nieminski, E.C., Ongerth, J.E. (1995) "Removing *Giardia* and *Cryptosporidium* by Conventional Treatment and Direct Filtration," *JAWWA*, **87**(8), pp. 96-103.
- O'Melia, C.R. and Ali, W. (1978) "The Role of Retained Particles in Deep Bed Filtration," *Prog. Water Tech.*, **10**(5), pp. 167-182.
- Payatakes, A.C., Tien, C., and Turian, R.M. (1974) "Trajectory Calculation of Particle Deposition in Deep Bed Filtration: Part II. Case Study of the Effect of Dimensionless Groups and Comparison with Experimental Data, *Jour. AIChE*, **20**, pp. 889-900.
- Rajagopalan, R. & Tien, C. (1976) "Trajectory Analysis of Deep-Bed Filtration with the Sphere-in-Cell Porous Media Model," *AIChE Jour.* **22**(5), pp. 523-533.
- Raveendran, P. and Amirtharajah, A. (1995) "Role of Short-Range Forces in Particle Detachment During Filter Backwashing," *Jour. Envir. Engrg. Div. in ASCE*, **121**, pp. 860-868.
- Swertfeger, J., Metz, D.H., DeMarco, J., Braghetta, A.,

- Jacangelo, J.G. (1999) "Effect of Filter Media on cyst and oocyst Removal," *JAWWA*, **91**(9), pp. 90-100.
- Tobiason, J.E., Vigneswaran, B. (1994) "Evaluation of Modified Model For Deep Bed Filtration," *Wat. Res.*, **28**(2), pp.335-342.
- Vigneswaran, S. and Chang, J.S. (1986) "Mathematical Modeling of the Entire Cycle of Deep Bed Filtration," *Water Air Soil Pollution*, **29**, pp. 155-164.
- Vigneswaran, S. and Tulachan, R.K. (1988) "Mathematical Modeling of Transient Behaviour of Deep Bed Filtration," *Water Research*, **9**, pp. 1093-1100.
- Yao, K.M. (1968) "Influence of suspended Particle size on the Transport Aspect of Water Filtration", Doctoral Dissertation, Univ. of North Carolina, Chapel Hill.
- Yao, K.M., Habbian, M.T., and O'Melia, C.R. (1971) "Water and Wastewater Filtration: Concepts and applications," *Environ. Sci. Technol.*, **5**, pp. 1105-1112.