

Network 모델을 이용한 입상여과공정의 전이상태 해석에 대한 연구

주창업

한성대학교 기계시스템공학과
136-792 서울시 성북구 삼선동 3가 389

(2006년 6월 29일 접수; 2006년 11월 14일 채택)

A Study on the Transient State of Deep Bed Filtration by the Network Model

Changupp Choo

Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung University
389 Samsun-dong, 3-ga, Sungbuk-gu, Seoul 136-792, Korea

(Received for review June 29, 2006; Revision accepted November 14, 2006)

요 약

현탁액중의 부유입자를 제거하는 입상여과공정을 Network 모델을 이용하여 여과효율과 압력손실에 대해 예측하였다. 구형 여재로 구성되어 있는 여재 층을 node와 원통형 bond로 구성된 network로 가정하였으며 여과공정을 통해 부유입자는 bond 표면에 포집된다. 원통형 bond에서의 여과효율은 bond의 세공부피를 단위 cell의 유체 막 부피로 가정하여 입자의 경로 분석을 이용하여 구하였으며, 포집된 부유입자가 추가적인 여재로서의 역할은 bond 세공이 좁아짐에 따른 효율 증가로 나타내었다. 또한 세공이 좁아짐에 따른 압력손실도 예측하였다. 본 network 모델의 세공 분포를 부여하는 과정의 stochastic한 성질로 인하여 많은 전산모사가 필요하지만, 본 모델을 이용하여 여과효율과 압력손실을 동시에 예측할 수 있었다.

주제어 : 입상여과, 네트워크 모델, 전이상태

Abstract—Collection efficiencies and pressure drops for the removal of small particles from dilute liquid suspensions by granular bed filter were calculated using network model. The network model is composed of a number of nodes connected with cylindrical bonds and particles are deposited on the bond surface. The collection efficiency of each cylindrical bond was predicted using unit cell model corresponding to the pore volume of cylindrical pore both at the initial and transient states. Deposited particles on the collector surface may act as additional collector and reduce the pore size of the collector. As a result, the collection efficiency was improved and pressure drop increased with deposition. Even though the stochastic nature of network requires a large number of simulation work, the model proposed in this study can be used in investigating collection efficiency and pressure drop.

Key words : Deep bed filtration, Network model, Transient state

1. 서 론

입상여과는 수 처리와 폐수처리에 있어서 부유입자들을 제거하기 위하여 널리 사용되고 있다. 부피비로 0.05% 미만의 낮은 농도의 입자들을 포함하고 묽은 현탁액에 일반적으로 적용되고

있다. 입상여과공정은 입자들을 포함하고 있는 현탁액을 여재가 포함된 층을 통과시킴으로서, 액상의 입자들이 여재표면에 포집되는 과정을 통하여 부유입자들이 제거되는 공정이다. 대부분의 입상여과공정에서는 여재 표면에 포집된 입자들은 일정시간이 경과한 후에 역 세척 공정을 거쳐 제거되며, 재생된 여재입자는

여과공정에 지속적으로 사용할 수 있다. 입상여과는 100-200 μm 의 여재 내부의 공극으로 수십 μm 이하의 부유 입자가 여과재 입자표면 또는 이미 포집되어 있는 입자표면에 전기화학적 작용, 화학적 가교, 흡착 작용 등에 의해 포집되거나 screening 작용에 의해 현탁액으로부터 분리된다. 입상여과에서 주어진 유량 및 입자농도에서 필요로 하는 여과 효율 효율을 얻기 위해서는 부유입자와 여재의 직경, 여재층 높이, 여과 속도 등의 최적 조작조건을 결정하는 것이 중요하다.

입상여과에 있어서 중요한 항목은 부유입자들을 제거하는 여재 층의 부유입자 여과효율(collection efficiency)과 입자들이 제거됨에 따른 충전 물질 사이의 세공이 좁아지고 일부는 막히는 관계로 압력 차가 증가되는 현상이다. 이러한 현상으로 입상여과는 비정상 상태의 조작이다. 초기상태의 입상여과의 여과효율에 대한 모델은 많이 제시되어 있으며 그 모델에 의한 예측 결과도 실험과 많이 일치하나[1,2] 여과가 진행됨에 따른 전이 상태(transition state)에서의 입상여과에 대한 여과효율 예측 모델에 대해서는 복잡한 현상으로 인하여 기존 모델의 개선 [3,4] 또는 현탁액의 흐름에 대해 network 모델[5-8]을 이용하고 있으나 network의 세공에서의 여과효율에 대해서는 명확한 계산 근거를 제시하지 못하고 있으며 임의의 변수를 도입하여 실험결과를 해석하고 있다. 특히 network 모델에서는 세공을 원통형으로 가정하고 있으나 입자의 경로분석을 통한 여과효율의 계산에 있어서 원통형 세공의 경우는 매우 낮은 여과효율을 나타내는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 network 모델을 이용하여 여과 공정이 진행됨에 따른 여과효율과 압력손실의 증가에 대해 조사하였다. Network 모델의 적용에 있어서 세공 벽에 포집되는 여과효율은 기존의 Happel 모델[9]을 확장하여 세공 벽에서의 여과효율을 구하였으며, 여과 공정이 진행됨에 따라 포집된 입자가 추가적인 여재 역할을 하며, 또한 network의 세공을 좁게 함으로서 여과효율의 증가와 압력손실의 증가를 전산모사를 통하여 예측하였다. 또한 network 모델의 크기, network의 구성, 운전변수의 영향을 조사하였다.

2. 이론적 연구

2.1 Model description

여과공정이 진행되어 감에 따라 제거되는 입자들의 퇴적 정도는 단위 여재 부피당 제거된 입자들의 부피로 정의되는 specific deposit으로 표시될 수 있다. 여과공정이 진행됨에 따른 specific deposit, σ 의 시간당 변화율은 일반적으로 다음과 같이 표시한다.

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda u_s c \quad (1)$$

여기서 u_s 는 액체의 걸보기 속도이며 c 는 부유입자들의 농도이다. 입자제거 속도는 현탁액에 포함된 입자들의 양인 $u_s c$ 에 비례할 것으로 예상되며 filter coefficient, λ ,는 상기 식 (1)의 비례상수이다. 여재의 입자제거 과정을 모사하기 위해서는 여재가

collector의 집합체로 구성되어 있다고 가정할 수 있으며 collector들은 형태와 크기가 같다고 가정한다.[1] 개개의 collector들의 여과효율(즉 단위 collector의 입자제거 능력), η 와 filter coefficient의 관계는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\lambda = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{1}{1-\eta} \right) = \frac{\eta}{l} \quad (\eta \ll 1) \quad (2)$$

여기서 l 은 축 방향으로의 단위 collector의 길이이다.

입자들이 여재 층에 포집됨에 따라 여과 능력에 미치는 영향은 일반적으로 다음과 같이 표현한다.

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = F(\underline{\alpha}, \sigma) \quad (3)$$

여기서 F 는 침적된 입자들이 filter coefficient에 영향을 미치는 상관인자로 $\underline{\alpha}$ 는 매개변수 벡터이다. 아래첨자 0는 초기 상태를 나타낸다. 또한 침적된 입자들이 여재 층의 압력손실에 미치는 영향은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta P}{(\Delta P)_0} = G(\underline{\beta}, \sigma) \quad (4)$$

여기서 ΔP 는 압력손실이며, G 는 압력손실에 영향을 미치는 상관인자로 $\underline{\beta}$ 는 매개변수 벡터이다. 따라서 전이 상태에서의 여과는 다양한 운전변수, 시스템 변수뿐만 아니라 specific deposit의 함수로 예상되는 F 와 G 를 밝혀내는데 있다.

충진 여재 층의 입자 여과효율을 조사하는 방법으로는 여재 층을 단위 cell의 집합체로 가정하여 cell 주위에서의 유체흐름을 단순화 시킨 여러 가지 모델이 제시되어 있으며, 초기의 여과효율에 대해서는 실험결과와 부합되는 예측결과를 나타내지만 여과공정이 진행됨에 따른 여과효율 변화를 예측하기 위해서는 여재 표면에 부착된 부유입자들의 유체흐름에 미치는 영향을 고려해야 한다. 또한 단위 cell 모델로는 여과공정이 진행됨에 따른 압력손실 증가에 대해서는 설명할 수 없는 단점이 있다. 압력손실 변화를 위해서는 일반적으로 network 모델을 사용할 수 있으나 network 모델을 구성하는 관의 형상이 원통형인 관계로 여과효율 예측에는 실험보다 적게 계산되는 결과를 나타낸다.

일반적으로 network 모델에 사용하는 구조는 Figure 1과 같은 형태이다. 그러나 network이 커질 경우 많은 전산해석 노력이 필요하고 또한 각 network의 연결점(node)과 연결관(bond)의 수를 정하는데 있어서 임의의 가정이 필요하다. 본 연구에서 사용한 network을 Figure 2에 나타내었다. 각 연결점에는 6개의 원통형 연결관이 연결되어 있으며 각 연결점에 유입되는 현탁액은 연결점에서 균일하게 혼합되며 각 연결점의 압력 분포 및 conductivity에 따라서 유량이 배분되어 흐르게 된다. 원통형 연결관을 지나면서 부유입자는 연결관 벽에 일부 포집이 되며, 결과적으로 연결관의 직경을 감소시킨다. 결과적으로 연결관에서의 압력손실을 증가와 동시에 연결관 벽에 포집된 입자

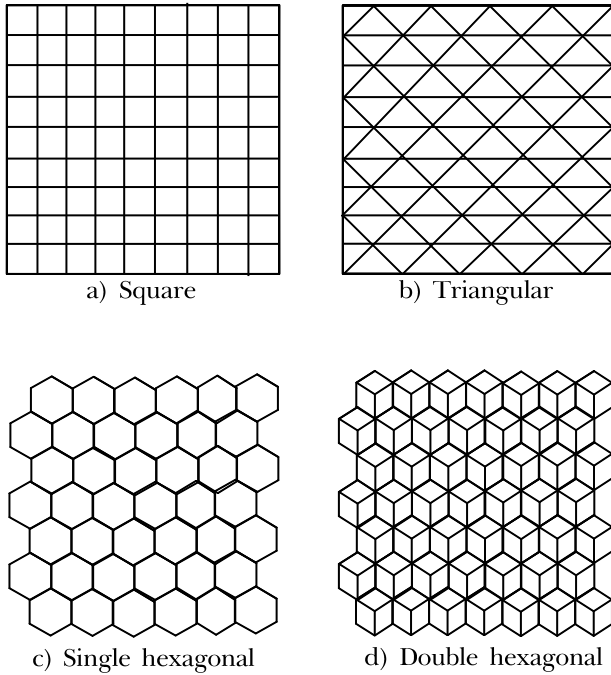


Figure 1. Typical types of the network model used in the literature.

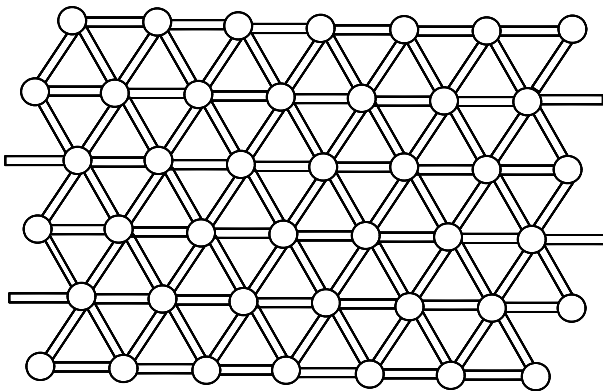


Figure 2. Schematic representation of the two dimensional triangular network model used in this study.

가 추가적인 여재 역할을 하여 결과적으로 입자 여과효율은 향상되게 된다.

2.2 압력손실

일정한 유량이 흐르는 입상여과 공정에서 Figure 2에서 제시한 network의 원통형 세공을 통과하는 유량을 배분하기 위해 Hagen-Poiseuille 식을 적용하면 다음과 같이 각 연결관에서의 conductivity는

$$\alpha = \frac{\pi d^4}{128 \mu l} \tag{5}$$

여기서 α 와 d 는 각각 연결관의 conductivity와 세공 직경을 나타내며 μ 는 유체의 점도이며 l 은 연결관의 길이이다. 연결관의 길이 l 은 Figure 2의 모델에서와 같이 반복성을 나타내므로 단위 collector의 지름으로 정하였다. 따라서 각 연결관에서의 부피 유량 q 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q = \alpha \Delta P \tag{6}$$

여기서 ΔP 는 연결관에서의 압력강하이다. 정상상태에서의 전체 network의 압력분포를 얻기 위한 계산은 다음과 같다. Network의 i 번째의 연결점에 대해서 연결점에 유입되는 유량과 유출되는 유량은 동일하므로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다

$$\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \Delta P_{ij} = 0 \tag{7}$$

여기서 α_{ij} 와 ΔP_{ij} 는 각각 i 번째 연결점에 연결된 j 번째 연결관의 hydraulic conductivity와 압력 강하이다. 따라서 식(7)은 i 번째 연결점에 연결된 모든 연결관을 통하는 유량의 합계를 나타낸다. Network의 각 연결점에 대해서 식 (7)을 적용하면 일련의 연립방정식이 얻어지며 경계조건으로 여재 층의 상층부, 즉 network의 최상층부의 모든 연결점에서 동일한 압력을 부여하면 Gauss 소거법을 이용하여 network 내의 압력분포를 구할 수 있다. 이러한 압력분포로부터 각 연결관을 통과하는 유량분포를 식 (6)으로부터 구할 수 있다.

부유입자가 세공 벽에 부착됨에 따라 증가되는 압력손실은 다음과 같이 conductivity의 비로 표시할 수 있다.

$$\frac{(\Delta P_{ij})}{(\Delta P_{ij})_0} = \frac{(\alpha_{ij})}{(\alpha_{ij})_0} \tag{8}$$

여기서 아래첨자 0는 초기상태를 나타낸다. 세공 벽에 부착된 입자로 인한 압력손실은 Happel 과 Brenner[10]가 제시한 방법을 사용하여 근사하면 다음과 같은 conductivity를 구할 수 있다.

$$\frac{1}{\alpha_{ij}} = \frac{8\mu l}{\pi R_0^4} + \frac{24\mu(N_p)_{ij}}{\pi R_0^4} a_p \left\{ 1 - \left(1 - \frac{a_p}{R_0} \right)^2 \right\}^2 K_1 \tag{9}$$

여기서 R_0 는 세공의 반경, $(N_p)_{ij}$ 는 i 번째 연결점, j 번째 연결관에 포집된 부유입자 수, a_p 는 부유입자 반경이며 K_1 은 다음과 같다.

$$K_1 = \frac{1 - \frac{2}{3} \left(\frac{a_p}{R_0} \right)^2 - 0.20217 \left(\frac{a_p}{R_0} \right)^5}{1 - 2.1050 \left(\frac{a_p}{R_0} \right) + 2.0865 \left(\frac{a_p}{R_0} \right)^3 - 1.7068 \left(\frac{a_p}{R_0} \right)^5 + 0.72603 \left(\frac{a_p}{R_0} \right)^6} \tag{10}$$

여과공정이 진행됨에 따라 충전 여재에 포집되는 부유입자들의 수는 증가하며, 또한 부착된 입자가 추가적인 여재로 작용함으로써 전반적인 부유입자 여과효율은 증가한다. 부유입자가 여재 표면에 많이 포집되어 층을 이룰 경우에는 식(10)은 더 이상 유효하지 않으며, 이 경우 세공 벽에 부착된 입자들로 인하여 세공 벽이 좁아지는 현상이 발생하고 결과적으로 현탁액의 유체흐름에 영향을 주는 세공의 유효직경이 감소하게 된다. 유효직경의 감소는 부착된 부유입자들이 매끄러운 층을 이룬다고 가정하여 계산하였다.

2.3 여과효율

입상여과에서 세공을 통한 유체의 흐름과 부유입자와 여재 사이에 작용하는 여러 종류의 힘을 알면 부유입자의 경로를 알 수 있으며 이로부터 부유입자가 여재 표면에 포집이 되는지를 결정할 수 있다. 그러나 여재 층 내의 유체 흐름의 복잡함과 여러 포집 과정에 대한 정확한 모사가 불가능한 관계로 일반적으로는 여재 층을 단순한 단위 cell 모델로 가정하며, 가정된 모델에서의 경로분석을 통하여 부유입자의 포집여부를 결정하여 전체 여재층의 여과효율을 구하고 있다. Rajagopalan과 Tien[11]은 Happel cell 모델에서의 여과효율에 대해서 경로분석을 통하여 다음과 같은 단위 cell에서의 여과효율의 예측 식을 제안하였다.

$$\eta = 1.5A_s(1 - \epsilon)^{2/3}N_R^2\left[\frac{2}{3}N_{Lo}^{-1/8}N_R^{-1/8} + 2.25 \times 10^{-3}N_G^1N_R^{2.4}\right] + 4(1 - \epsilon)^{2/3}A_s^{1/3}N_{Pe}^{-2/3} \quad (11)$$

여기서 N_{Lo} , N_G , N_R , N_{pe} 는 각각 London-force parameter, gravity parameter, interception parameter, Peclet 수이며 ϵ 는 여재 층의 공극률이다. 또한 A_s 는 Happel parameter로 다음과 같이 주어진다.

$$A_s = 2(1 - p^5)/w \quad (12)$$

여기서 $w = 2 - 3p + 5p^5 - 2p^6$ 이며 $p = (1 - \epsilon)^{1/3}$ 이다.

입자경로 분석에 의한 입자의 여과효율의 예측은 일반적으로 구형 단위 cell 모델의 경우에는 잘 적용되지만 network 을 구성하는 원통형 세공의 경우에는 그 예측 결과가 실험 또는 다른 단위 cell 모델에 의한 예측결과와의 차이가 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 원통형 세공의 입자 제거 효율을 세공 크기에 따라서 다음과 같이 구하였다. Figure 3에서와 같이 세공의 부피를 구형 여재를 둘러싼 유체의 부피로 환산하였으며 변환된 구형 cell 모델에 대해서 식 (11)을 적용하여 여과 효율을 계산하였다. 따라서 세공이 작을 경우에는 여재의 크기는 일정한 반면에 여재를 둘러싸는 유체의 부피가 줄어들고 따라서 식 (5)에서 $(1 - \epsilon)$ 항이 크게 되며, 결과적으로 단위 cell의 여과효율이 높아지게 된다. 실질적으로 부유입자가 원통형 세공을 통과할 때 세공이 좁아수록 세공 벽과 접촉할 확률이 높아지며 따라서 여

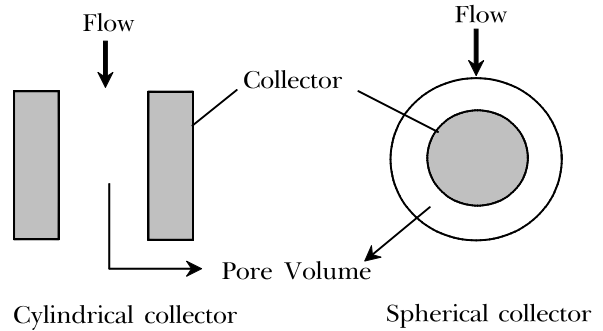


Figure 3. Unit cells of j -th type of cylindrical pore and its corresponding spherical collector at the initial stage.

과효율도 증대한다.

여과공정이 진행됨에 따라 여재 표면에 입자가 부착되고 이 부착된 입자가 추가적인 여재의 작용을 하여 여과효율은 향상된다. 향상된 여과효율을 예측하기 위해서 여재 표면에 부착된 부유입자가 Figure 4와 같이 원통형 세공의 표면에 매끄러운 입자 층을 형성한다고 가정하였다. 이 경우의 여과효율의 향상은 원통형 세공 벽에 부착된 입자 층을 구형여재의 주위에 Figure 4와 같이 입자 층을 형성하는 것으로 간주할 수 있으며 부유입자가 형성한 층을 유체가 통과하지 못하므로 결과적으로 collector의 크기가 증가되는 현상을 나타낸다. Collector의 크기의 증가는 식 (11)에서 공극률의 감소를 의미하므로 여과효율은 향상된다.

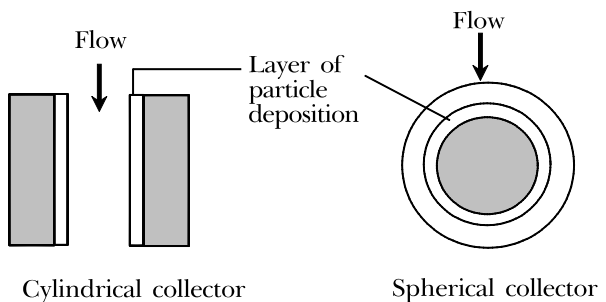


Figure 4. Unit cells of j -th type of cylindrical pore and its corresponding spherical collector with the increase of deposit.

2.4 수치모사 과정

먼저 Network의 가로방향과 축방향의 연결점 수를 결정한 후 각 연결관에 세공 크기를 부여한다. 세공크기를 결정된 후에 식 (5)에 의해서 각 연결관에서의 conductivity를 구하고 이에 따라 각 연결점에서의 압력을 결정한다. 따라서 각 세공에서의 유량을 구할 수 있다. 계산된 유량분포가 결정된 후에 부유입자들을 network에 주입한다. 첫 단의 연결점에서 부유입자들은

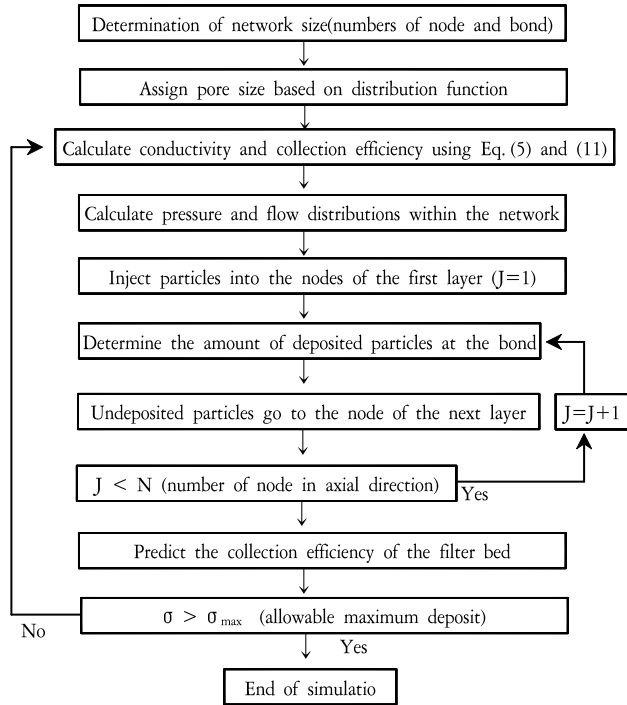


Figure 5. Simulation algorithm used in this network model.

유량을 따라 이동하며 각 연결관에서의 여과효율에 해당하는 분울 만큼의 입자가 세공 벽에 포집되고 포집되지 않은 부유입자들은 다음단의 연결점으로 들어간다. 각 연결점에서는 유입된 입자가 균일하게 혼합되며 다음단의 연결점으로 유량에 따라 배분되어 들어간다. 이렇게 하여 마지막 단에서 유출되는 입자농도를 구하여 전체 여재 층의 여과효율을 구하게 된다. 주입된 부유입자가 여재 층을 통과하면 세공에 부착된 부유입자들로 인한 각 세공에서의 conductivity를 재계산하고 유량 분포를 다시 구하도록 한다. 상기와 같은 과정을 반복하여 적절한 specific deposit에 도달할 때까지 계산과정을 계속하도록 한다. Figure 5에 개략적인 모사과정을 나타내었다. 본 모사과정에서 여재 직경으로 무차원화한 부유입자의 직경은 0.01, 여재의 공극률은 0.4, 그리고 현탁액의 걸보기 속도 0.1cm/sec를 사용하였다. 현탁액의 부유입자 농도는 부피 분율 $C_0=10^{-6}$ 을 사용하였다. 또한 여과공정이 진행됨에 따라 초기 여과효율에 대한 여과효율의 비율(Collection efficiency ratio), 초기 압력손실에 대한 압력손실의 비율(Pressure drop ratio)을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 세공 크기 분포

입상 여과공정의 경우 여과재 사이의 공간이 매우 다양하나 일반적으로 계산상의 편의를 위하여 균일한 세공으로 가정하여 여과효율 및 압력손실을 예측하고 있다. 그러나 본 연구에서는 network의 세공크기는 다음의 Raleigh 분포함수를 사용하여

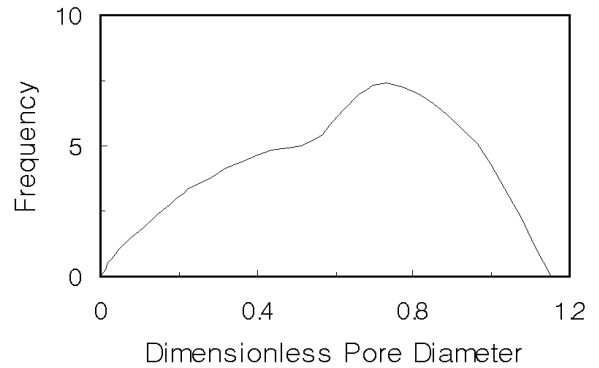


Figure 6. Pore size distribution used in this study.

배분하였다.

$$f_p = 2R_0 \exp(-R_0^2) \tag{13}$$

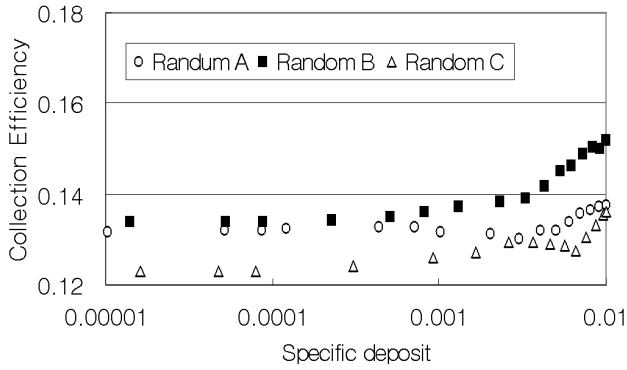
여기서 f_p 는 빈도이다. 식 (13)에 의하여, 여재의 직경으로 무차원 하여 배분한 세공 직경에 따른 빈도를 Figure 6에 나타내었다. 이러한 함수를 이용함으로써 실제 여재 사이의 다양한 공간을 표현할 수 있으리라 생각된다.

3.2 Raleigh 분포에 의한 network의 세공 크기 영향

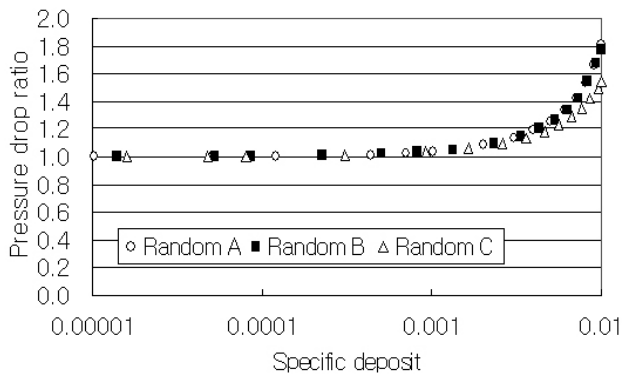
Raleigh 분포의 경우 network의 각 연결관에 크기를 부여하는 과정은 난수(random number)에 의하여 임의로 정해지며 그 분포는 Figure 6의 형태를 나타내게 된다. 따라서 난수에 의한 영향, 즉 연결관에 부여되는 직경의 영향을 Figure 7에 나타내었다. 초기의 난수 A, B, C를 부여하여 발생하는 일련의 난수를 연결관에 부여하여 얻어지는 각각 다른 세공 분포를 정하였을 때, Figure 7에서 알 수 있듯이 network 전체의 세공분포가 Figure 6과 같은 분포로 주어지는 경우에는 큰 차이가 없을 것을 알 수 있다. 난수에 의한 영향, 즉 임의의 연결관에 주어지는 세공 크기 변화에 따라 여과효율은 10-15%정도 차이가 나며 압력손실의 경우는 초기에는 차이가 없으며 충분한 입자 포집이 생긴 후에는 5% 정도의 차이가 발생한다. 이러한 차이는 network의 연결관에 부여된 세공직경의 분포에 의한 것으로 판단된다. 여과효율의 차이는 연결관에 부여되는 작은 세공의 직경이 상부에 많이 분포되는 경우에는 상부의 높은 농도의 입자들이 작은 직경의 연결관에서 포집되는 관계로 여과효율이 높게 나타난다. 압력손실의 경우는 작은 세공의 경우 부유입자가 포집됨에 따라 세공의 직경이 감소하고 이에 의한 conductivity 감소로 인한 것으로 판단된다. 따라서 향후의 모사 결과는 각각 다른 세 종류의 난수에 의해 생성된 세공 크기에 의한 결과의 평균을 구하여 나타내었다.

3.3 Network 크기의 영향

본 모사에서 사용한 network의 크기에 대한 영향을 살펴보았다. 축 방향 연결점의 수의 증가는 여재 층의 두께의 증가를 의



(a) Effect on collection efficiency.



(b) Effect on pressure drop.

Figure 7. Effect of random numbers.

미하므로 여과효율의 증가를 예상할 수 있으며, 횡 방향 연결점의 증가는 유체 유량의 증가만을 의미하므로 총 여과효율에 영향이 없을 것으로 예상된다. 그러나 3차원의 여과공정을 2차원의 모델로 단순화하여 모사하는 본 연구에서는 network의 크기에 의한 영향을 살펴보는 것이 필요하다. Figure 8은 Raleigh 분포에 의한 경우의 횡 방향 연결점의 크기에 대한 영향을 살펴 보았다. Figure 8에서 알 수 있듯이 횡 방향의 연결점 수는 예측 결과에 거의 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다. Network

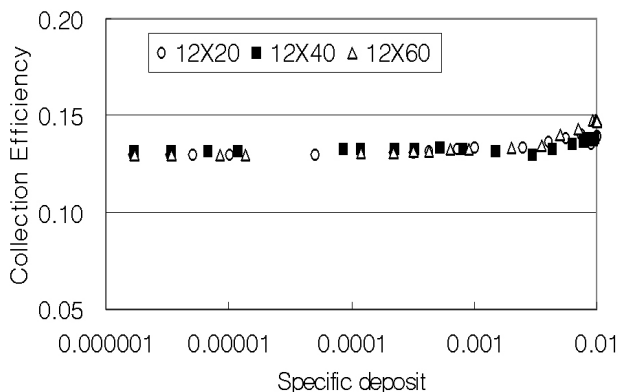


Figure 8. Effect of network size.

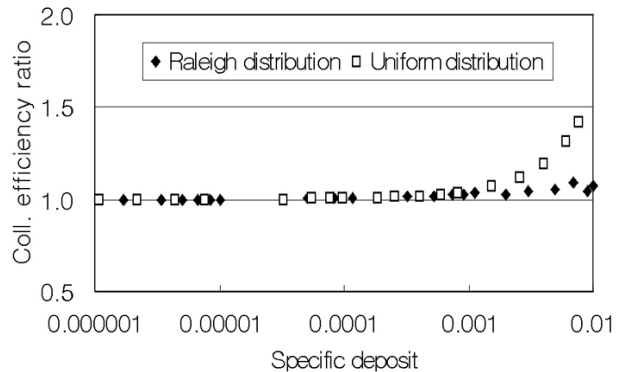
의 크기는 전산모사 시간에 많은 영향을 미치므로 Figure 8과 같이 본 연구에서 사용한 모델의 network 크기의 영향이 적은 관계로 비교적 작은 규모의 network를 이용하여 많은 전산모사 시간을 줄일 수 있다.

3.4 균일한 세공과 Raleigh 세공 분포의 비교

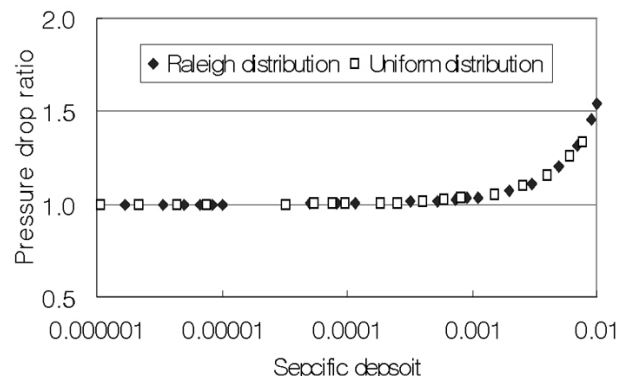
Figure 9는 network의 세공분포의 영향을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 균일한 세공과 Raleigh 세공분포에 따른 여과효율의 비교를 나타낸다. 균일한 세공의 경우가 Raleigh 세공분포보다 여과효율은 높게 나타나고 있다. 이는 균일한 세공에는 없는 크기의 세공이 Raleigh 세공분포에 존재하며, 큰 세공은 conductivity가 높은 관계로 세공을 통과하는 유량이 많은 반면에 여과효율은 낮게 예측되므로 전체 여재 층의 여과효율이 낮게 예측되고 있다. 그러나 균일한 세공과 Raleigh 분포 세공의 부피는 동일한 관계로 압력 손실은 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 입상여과 공정을 모사하는 과정에 있어서 세공 분포가 여과 효율에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.5 Network에 공급되는 입자들의 농도

Network의 초기의 세공분포가 주어지고 초기의 압력분포 및 유량분포가 얻어진 후 공급된 입자의 농도에 대한 영향을 살펴 보았다. 한번 공급된 입자가 여재 층을 통과한 후에 여재 표면에



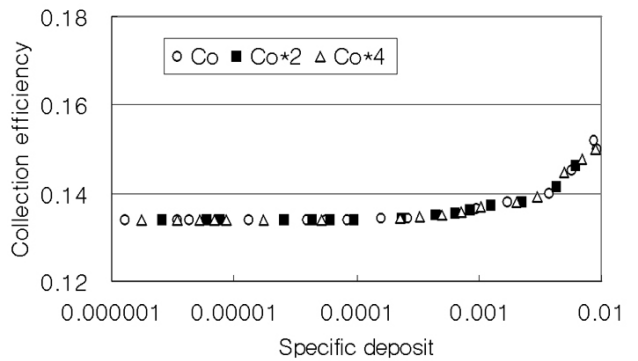
(a) Comparison of collection efficiency ratio.



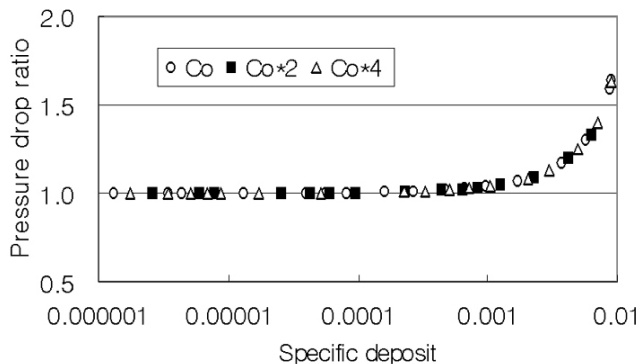
(b) Comparison of pressure drop ratio.

Figure 9. Effect of pore size distribution.

부착된 입자들이 여재 표면에 매끄러운 층을 형성한다고 가정하여 각 세공의 conductivity를 재계산하고 유량분포를 재배분한 후에 부유입자가 공급되므로 유량을 재계산하기전에 공급되는 입자의 농도는 중요할 것으로 판단된다. 실질적으로 여과공정이 진행되면서 여과효율과 압력손실 변화는 연속적이거나 본 모사 과정은 일정 부유입자가 여재 층을 통과한 후에 재계산이 이루어지는 관계로 입자들의 농도에 따른 변화가 나타날 것으로 예상되나 Figure 10의 결과는 부유입자 농도의 영향이 없는 것으로 나타났다. 본 모사에서 사용한 입자 농도는 부피 분율 $C_0=10^{-6}$ 으로, 이 농도의 2배, 4배일 때의 경우를 비교한 것으로 이 정도의 묽은 용액의 경우는 영향이 없는 것을 알 수 있다.



(a) Collection efficiency.



(b) Pressure drop ratio.

Figure 10. Effect of particle concentration

4. 결 론

현탁액에 포함되어 있는 부유입자를 제거하는 입상여과 공정이 진행됨에 따른 여과효율과 압력손실의 변화를 network 모델을 이용하여 수치 모사를 통하여 조사하였다. 부유입자들이 network의 세공 벽에 포집됨에 따라 변하는 여과효율의 변화를 구형 단위 cell로 변환하여 예측하였으며, 압력손실은 원통형 세공의 직경이 감소하는 과정을 고려하여 구하였다. 모사결과는 일반 여과공정에서 발생하는 현상을 대체적으로 잘 설명하고 있

다. 그러나 난수를 발생하여 network의 세공분포를 부여하고 포집여부를 결정하는 과정에서 stochastic 모사의 특성상 여러 난수에 대한 결과의 평균을 구해야 하는 관계로 모사시간이 다소 오래 걸리는 단점이 있다. 본 모델에서 여과공정을 해석하는 과정에 있어서 network의 세공 분포가 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 따라서 여재의 세공 분포에 대한 세밀한 조사가 있어야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 여과 공정의 모델 변수만을 영향을 살펴보았으나 향후 여과공정의 여러 운전변수에 대한 연구가 필요할 것이며, 또한 본 연구에서는 단일 크기의 부유입자에 대한 영향을 살펴보았으나 실제 여과공정에서는 다양한 크기의 부유입자들이 포함되어 있으므로 이에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서 제시한 모델과 모사 결과를 현장에 적용하기 위해서는 실험과 비교하여 본 모델을 개선해야 할 것이다.

감 사

본 연구는 2006년도 한성대학교 교내연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

사용기호

- A_s Happel parameter
- c concentration
- d bond diameter
- f_p frequency
- l length of unit collector
- N_G gravity parameter
- N_{Lo} London-force parameter
- N_R interception parameter
- N_p number of deposited particles
- N_{pe} Peclet number
- u_s superficial velocity
- ΔP pressure drop
- R_0 radius of bond
- t time

Greek letter

- α conductivity
- ϵ porosity
- η collection efficiency of unit collector
- λ filter coefficient
- μ viscosity
- σ specific deposit

subscript

- ij i-th node and j-th bond
- 0 initial condition

참고문헌

1. Payatakes, A. C., Tien, C., and Turian R. M., "A New Model for Granular Porous Media : Part I. Model Formulation," *AIChE J.*, **19**, 58 (1973)
2. Payatakes, A. C., Rajagopalan, R., and Tien, C., "Application of Porous Media Models to the Study of Deep Bed Filtration," *The Can. J. of Chem. Eng.*, **52**, 722 (1974)
3. Choo, C.-U. and Tien, C., "Simulation of Hydrosol Deposition in Granular Media," *AIChE J.*, **41**, 1426 (1995)
4. Choo, C.-U. and Tien, C., "Analysis of the Transient Behavior of Deep Bed Filtration," *J. of Colloid Inter. Sci.*, **169**, 13 (1995)
5. Sharma, M. M., and Yortsos, Y. C., "A Network Model for Deep Bed Filtration Processes," *AIChE J.*, **33**, 1644 (1987)
6. Rege, S. D., and Fogler, H. S., "A Network Model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops," *AIChE J.*, **34**, 1761 (1988)
7. Imdakm, A. O., and Sahimi, M., "Computer Simulation of Particle Transport Processes in Flow through Porous Media," *Chem. Eng. Sci.*, **46**, 1977 (1991)
8. Chang, Y.-I., Chen, S.-C., Chan, H.-C., and Lee, E., "Network Simulation for Deep Bed Filtration of Brownian Particles," *Chem. Eng. Sci.*, **59**(21), 4467 (2004)
9. Happel, J., "Viscous Flow in Multi-Particle System," *AIChE J.*, **4**, 197 (1958)
10. Happel, J. and Brenner, H., "Low Reynolds Number Hydro-dynamics," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1965)
11. Rajagopalan, R. and Tien, C., "Trajectory Analysis of Deep Bed Filtration with the Sphere-in-Cell Porous Media Model," *AIChE J.*, **22**, 523 (1976)