

입상여과에 의한 비균일 부유입자 제거공정 모사

주 장 업

한성대학교 산업 및 기계시스템 공학부

Simulation of poly-dispersed suspended solid removal by deep-bed filtration

Changupp Choo

Division of Industrial and Mechanical System Engineering, Hansung University, Seoul, 136-792, Korea

요 약

입상여과를 이용하여 현탁액에 포함되어 있는 비균일 입자를 제거하는 공정에 대한 모델을 제시하였고 전산모사를 통하여 여과가 진행됨에 따른 입자 제거 능력을 조사하였다. 여과재 표면에 포집된 입자들은 여과재의 세공을 좁게 하며 따라서 여과가 진행됨에 따라 입자제거능력이 증가하게 된다. 여러 가지 크기의 입자들이 포함된 현탁액의 여과 공정의 경우에는 입자들의 부피평균에 의한 단일입자의 경우보다 향상된 여과효율을 나타내었다. 이는 크기가 큰 입자들이 세공표면에서 추가의 여과재 역할을 하며 또한 유체가 흐르는 세공을 좁게 하므로써 작은 입자들이 여과재의 표면과 접촉하는 기회를 증대시켜 결과적으로 총괄 여과효율의 증가를 나타낸다.

ABSTRACT : A model was proposed for the removal of poly-dispersed suspended solid by deep bed filtration and the collection efficiency was investigated by computer simulation. Deposited particles on the collector surface may act as additional collector and reduce the pore size of the collector. As a result, the capability of removing suspended particles of the filter bed was improved with the deposition. The filtration process of poly-dispersed suspensions shows higher collection efficiency than that of mono-dispersed suspensions. Since the large particles deposited on the collector surface may contribute to the increase of contact between collectors and small particles, the improved overall collection efficiency was obtained.

1. 서 론

입상여과는 그 한 방법인 모래여과를 2000년전 부터 이집트에서 음용수 처리에 이용한 기록이 있는 만큼 그 조작성이 간단하고 저렴한 투자비 및 운전비로 인하여 용수나 폐수 처리에 광범위하게 사용되고 있다. 따라서 경험적으로 많은 자료가 축적되어 있는 관계로 그 여과 효과나 원리 등에 대해서는 별로 깊이 있는 연구가 진행되지 못한 부문이나 해저 유전의 개발과 개발된 해저 유전에서 채유 능력 및 효율을 증대시키기 위한 연구의 필요성이 대두되면서 많은 주목을 받게 되었다. 또한 폐수 처리나 음용수 처리에 있어서 부유 입자들을 제거하기 위하여 입상여과가 이용되는 과정에서 정확한 설계 및 설비의 효율 예측을 위해서 여과 현상에 대한 이론적인 연구가 필요하게 되었다. 특히 최근에는 막을 이용한 공업용수의 재이용에 대한 관심이 높아지면서 고가인 역삼투막의 보호 측면에서 전처리 공정인 옹집, 침전, 여과 공정의 강화를 통한 막 수명의 연장을 위한 방향으로 이용되고 있다. 그러나 대부분의 모래, 또는 다층여과의 충전탑 구성에는 단순한 경험적인 결과를 적용하여 입상 여과의 충전여재의 크기, 충전층의 높이 등을 정하고 있는 실정이다. 그러나 여과 공정은 부유물질과 충전층내의 충전물질, 그리고 대상용액의 성질에 따라 여러 가지의 힘과 여과 메커니즘이 작용하는 관계로 여과층의 설계 이전에 충분한 부유물질의 물리적 성질과 분리목적에 따라서 적절한 충전층 물질 크기와 높이를 정해야 할 필요성이 있다. 이러한 사전 검토를 무시하고 여과층을 설치하였을 경우 충분한 여과 효율을 얻지 못함으로써 후속 공정에 대한 효율 저하 내지는 심한 경제적 손실을 야기할 수 있다.

입상여과에 있어서 중요한 항목은 부유입자들을 제거하는 여과층의 부유입자 제거능력(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 입자 제거 능력에 대한 모델[1-3]은 많이 제시되어 있으며 그 모델에 의한 예측 결과도 실험과 많이 일치하나

여과가 진행됨에 따른 전이상태 (Transition State)에서의 입상여과에 대한 여과 효율 예측 모델에 대해서는 복잡한 현상으로 인하여 기존 모델의 개선[4-5] 또는 현탁액의 흐름에 대해 Network 모델[6-7]을 이용하고 있으나 많은 전산작업을 필요로 하고 있다. 특히 현재까지의 연구는 단일 크기의 부유입자 제거 효율 예측에만 국한되었던 관계로 실 폐수와 같이 다양한 크기의 부유입자를 포함하는 현탁액의 경우는 부유입자 크기를 평균하여 기존에 개발된 모델에 적용하였다. 그러나 Veerapaneni 와 Wiesner [8]는 여러 가지 크기의 입자가 포함된 경우, 실험을 통하여 입자들 상호간에 영향이 있음을 보여주었다. 따라서 다양한 크기의 입자를 포함하는 경우에 적용할 수 있는 모델 개발이 필요하며 효율적이고 경제적인 여과 공정의 선정이 이루어지기 위해서는 크기가 다른 부유입자 상호간의 영향에 의한 여과 효율 및 압력강하 예측에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 비균일 입자가 포함되어 있는 현탁액을 입상여과를 통하여 제거할 때 입자간에 상호 영향을 조사하고 여과가 진행됨에 따른 입자제거효율 변화를 예측하는 모델을 제시하고 컴퓨터를 이용한 모사실험을 수행하였다.

2. 이론적 연구

2.1 Unit Bed Element

입상여과에 있어서 이론적으로는 부유입자들과 충전여재(Media) 사이에 작용하는 각종의 여러 가지 힘들과 여과층내에서 유체흐름의 형태를 규명할 수 있으면 부유입자들이 여재 표면에 포집여부를 알 수 있다. 여재와 부유입자들 사이에 작용하는 힘으로는 Gravitational Force, Lifshitz van der Waals Interaction Force, Electrostatic Interaction Force, Acid-Base Interaction Force, Hydrodynamic Interaction Force 등이 있다. 또한 여과층내의 유체 흐름에 대해서는 단순화하여 Creeping, 또는 Brinkman 흐름을 가정하기도 한다. 따라서 가정된 유체 흐름과 작용하는 힘을 고려하여 부유입자가 충전층을 지나가는 경로를 구하여 부유입자가 충전층에 포집되는가를 결정할 수 있다. 그러나 여과층내의 유체흐름 형태가 매우

복잡하고 충전여재의 형태도 그 형상이 매우 다양한 관계로 여러 가지 가정과 단순화를 하여서 기준의 모델로 삼는데 본 연구에서는 Payatakes 등이 제시한 Unit Bed Element(UBE)[3]의 개념을 이용하였다. UBE 개념에서는 여과층을 동일한 두께의 Element로 구성되어 있다고 가정하여 각 Element는 일정한 Unit Cell로 구성되어 있다고 가정한다. 따라서 Unit Bed Element의 입자제거능력은 Unit Cell의 제거능력으로 표시할 수 있으며 전체 여과층의 제거 능력은 이러한 UBE 각각의 제거능력의 합으로부터 계산할 수 있다. 이러한 관계를 Fig. 1에 표시하였다. Fig. 1에서 UBE의 두께, l ,은 다음과 같이 주어진다.

$$l = \left[\frac{\pi}{6(1 - \epsilon_0)} \right]^{1/2} d_g \quad (1)$$

여기서 d_g 는 충전여재의 직경이며 ϵ_0 는 충전여재의 초기 공극률이다.

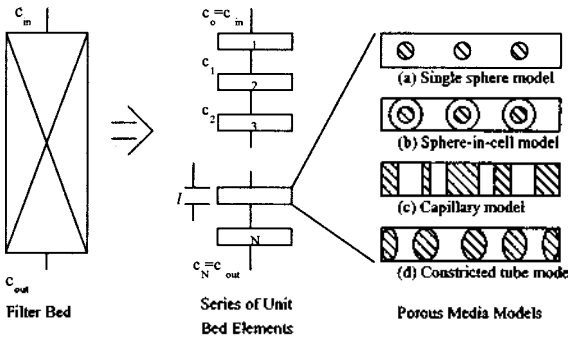


Fig. 1. Concept of unit bed element of granular bed

Unit Cell의 입자 제거능력을 조사하는 방법으로는 Unit cell의 형태와 cell 주위에서의 유체흐름을 가정하여 여러 가지 모델의 제시가 가능하며 여과 공정이 진행됨에 따른 여과 효율 변화에 대해서는 침적된 부유입자들이 유체 흐름과 여과 효율에 미치는 영향을 고려해야 한다. 본 연구에서는 UBE가 Fig. 2와 같이 여러 크기의 원통형 세공을 갖는다고 가정하였다.

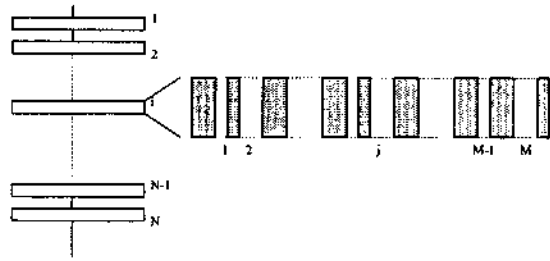


Fig. 2. Unit bed element model proposed in this study

2.2 세공에서의 유량

일정한 유량이 흐르는 입상여과 공정에서 Fig. 2에서 제시한 원통형 세공을 통과하는 유량을 배분하기 위해 Hagen-Poiseuille 식을 적용하면 다음과 같이 각 세공에서의 Conductivity는

$$(a)_{ij} = \frac{\pi d_{ij}^4}{128\mu l} \quad (2)$$

여기서 a_{ij} 와 d_{ij} 는 각각 i 번째 UBE의 j 번째 세공에서의 Conductivity와 세공 직경을 나타내며 μ 는 유체의 점도이다. 따라서 각 세공을 흐르는 유체의 유량 q_{ij} 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$q_{ij} = a_{ij}(P_{j-1} - P_j) \quad (3)$$

여기서 P_{j-1} 과 P_j 는 각각 $j-1$, j 번째의 UBE에 걸리는 압력으로 동일한 UBE에 포함되어 있는 세공 들에는 각각 동일한 압력이 걸리는 것으로 가정하였다.

2.3 여과 효율

입자경로 분석에 의한 입자의 포집효율의 예측은 일반적으로 구형 단위 Cell 모델의 경우에는 잘 적용되지만 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.

Fig. 3 에서와 같이 세공의 부피를 구형 여과재를 둘러싼 유체에 부피로 환산하여 구형 Cell에서의 여과효율을 나타내는 Payatakes등[3]이 제시한 다음의 식을 이용하였다.

$$\eta_{H_0} = 1.5A_s(1-\epsilon)^{2/3}N_R^2\left[\frac{2}{3}N_{LO}^{1/6} + 2.25 \times 10^{-3}N_G^{1.2}N_R^{-2.4}\right] + 4(1-\epsilon)^{2/3}A_s^{1/3}N_{Pe}^{2/3} \quad (4)$$

여기서 η_{H_0} 는 단위 Cell (Happel's Cell)의 여과 효율이며 N_{LO} , N_G , N_R , N_{Pe} , 와 A_s 는 각각 London Force Parameter, Gravitational Parameter, Interception Parameter, Peclet Number, 그리고 Happel Parameter 이다. 따라서 세공이 적을 경우에는 구형 Media의 크기는 일정한 반면에 구형 Media를 둘러싸는 유체의 부피가 줄어들고 따라서 식 (4)에서 $(1-\epsilon)$ 항이 크게 됨으로서 결과적으로 단위 Cell의 여과효율이 높아지게 된다. 실질적으로 부유입자가 원통형 세공을 통과할 때 세공이 좁을수록 세공 벽과 접촉할 확률이 높아지며 따라서 여과효율도 증대한다.

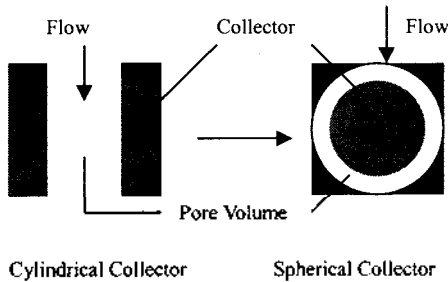


Fig. 3. Unit cells of i-th type of cylindrical pore and its corresponding spherical collector

입자 포집단계는 Fig. 4에서와 같이 3단계로 나누어 생각할 수 있다. 첫단계는 초기단계로 입자가 세공벽에 부착되며 두 번째 단계에서는 세공벽에 부착된 입자가 새로운 포집체로 작용하여 부유입자 표면에 새로운 입자가 부착되게 되며 세공 입구의 크기는 점점 작아짐과 동시에 입자 제거효율은 증가되는 반면에 세공을 통과하는 유량은 감소하게 된다.

일반적으로 부유입자들은 충전여재의 상부 표면에 부착되므로 그림에서와 같이 원통형 세공의 상부에만 포집되는 것으로 가정하였다. 세공크기가 작아짐에 따른 유량감소는 부착된 입자들의 공극률을 고려하여 입구의 감소된 직경을 이용하여 식 (3)을 적용하여 구한다. 마지막 단계는 세공벽이 막히는 단계로 완전히 막히게 되면 더 이상 유체는 흐르지 않고 다른 세공을 통과하게 된다.

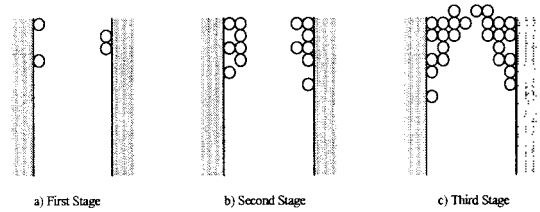


Fig. 4. Three stages of deposition processes

2.4 비균일 부유입자의 여과 공정 모사

매번 충전층에 공급되는 각각의 부유입자는 일정 크기 분포 함수에 의해서 그 크기가 결정되고 충전층의 첫 번째의 UBE에 공급된다. 공급된 입자가 선택된 세공에서의 식(4)에 의하여 여과 효율을 계산하고 0과 1사이의 Random 수를 발생하여 Random 수가 여과 효율보다 작으면 세공벽에 포집되고 충전층 입구에서 새로운 입자를 공급한다. 포집되지 않으면 다음층의 UBE의 다른 세공으로 공급되며 새로운 Random 수를 여과 효율과 비교한다. 이러한 과정을 반복하여 일부 입자는 충전여재에 포집되고 나머지 부유입자는 충전층을 통과하여 유출수로 배출된다. 충전여재의 세공 표면에 포집된 입자는 충전여재의 세공 크기를 작게하며 많은 입자가 포집되는 세공은 막히게 된다. 부유입자가 포집될때마다 유체의 흐름을 재 계산하며 각각의 세공에서의 여과효율도 변하게 된다. 공급된 입자와 충전층에 포집된 입자를 구하여 여과층의 단위 부피당 침적된 입자들의 부피 (Specific Deposit)가 증가됨에 따른 입자별 여과효율과 총괄여과 효율을 구하였다.

Simulation 마다 Random 수에 의해 부유입자의 크기 및 선택 경로를 선택하여 그 결과를 구하고 한가지 조건에 대해서 4가지의 각각 상이한 Random

수를 이용한 결과를 종합, 평균하여 충전층의 제거능력을 구하였으며 여과공정이 진행됨에 따라 Specific Deposit이 증가하며 이때의 입자 제거효율을 구한다. Fig. 5는 수치적 모사의 Algorithm을 나타내고 있다.

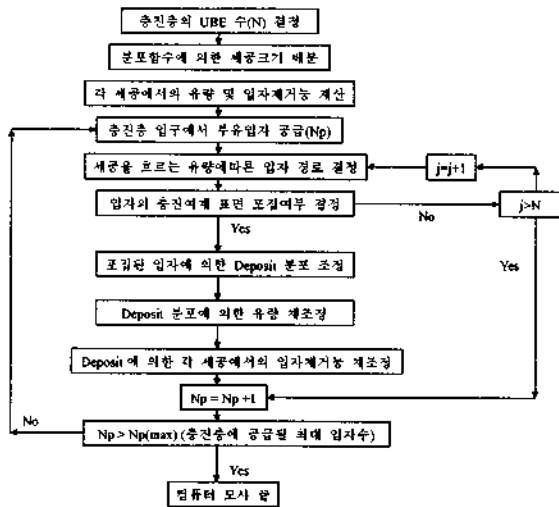


Fig. 5. Simulation algorithm for the prediction of particle removal efficiency

3. 결과 및 고찰

3.1 세공 크기 분포

본 연구에서 사용한 입상여과의 UBE의 세공크기는 Rayleigh 분포함수를 사용하여 배분하였으며 여재의 직경으로 무차원화한 세공 직경에 따른 빈도를 Fig. 6에 나타내었다.

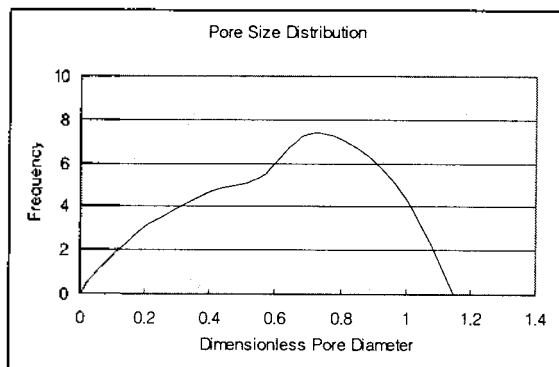


Fig. 6. Pore size distribution used in this study

3.2 Random 수의 변화에 따른 여과 효율 예측 결과의 변화

수치 모사에 있어서 입자의 이동 경로와 세공 벽에 포집될 가능성은 Random 수를 생성하여 Random 수가 입자가 통과하는 세공에서의 단위여과 효율보다 작으면 그 세공에 포집되며 Random 수가 클 경우에는 그 세공을 통과하여 다음의 UBE에 공급된다. 따라서 초기의 지정해주는 Random 수에 따라서 여과 효율이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 초기의 지정해주는 Random 수의 변화에 따른 여과 효율 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 여과가 진행됨에 따른 여과 효율은 500개의 입자가 공급될 때마다 500개의 입자중 충전여재에 포집된 입자수를 구하여 여과효율을 계산하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 서로 다른 Random 수 생성에 의한 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 따라서 4종류의 초기 Random 수를 이용하여 얻어진 결과를 평균하여 여과 효율을 구하였다.

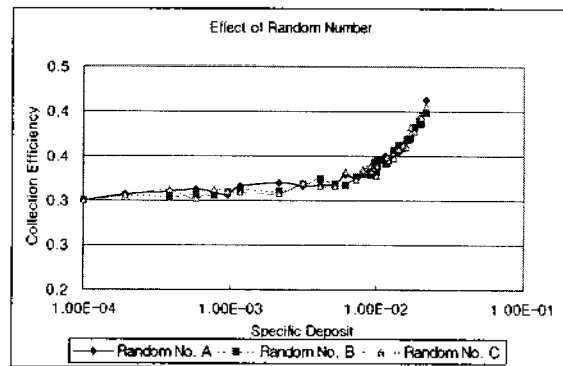


Fig. 7. Effect of random numbers on collection efficiency

3.3 여과 효율

Fig. 8은 크기가 4 μ m, 8 μ m, 16 μ m인 입자들이 동일 수량 혼합되어 있는 경우의 여과가 진행됨에 따라, 즉 단위부피당 침적된 입자의 부피 증가에 따른 각각의 여과효율을 나타내고 있다. 4 μ m, 8 μ m, 16 μ m의 입자를 각각 1개씩 반복하여 충전층에 공급하여 각각 500개의 입자가 공급될 때마다 충전여

재에 포집된 입자의 수를 이용하여 입자 크기에 따른 여과효율을 구하였다. 여과 공정이 진행됨에 따라서 충전여재 표면에 포집된 입자가 여재의 세공을 좁게 하며, 더 나아가서는 세공을 막히게 함으로서 제거효율의 향상됨을 나타내고 있다. 여과효율은 입자가 클수록 향상 속도가 크며 이는 작은 입자는 세공을 통과하더라도 큰 입자는 세공의 Sieving 효과에 의해 충전여재 표면에 포집되기 때문이다.

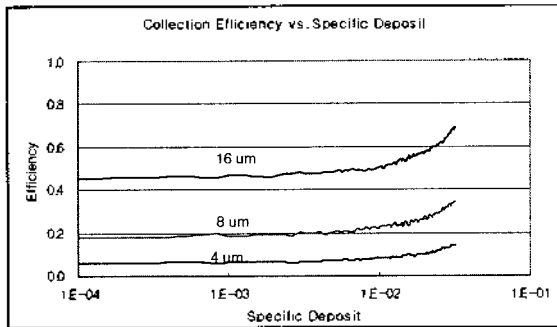


Fig. 8. Effect of particle size on collection efficiency

여러 크기의 입자들이 혼재되어 있는 경우의 입자간의 작용을 조사하기 위하여 $4\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}$, $16\mu\text{m}$ 입자가 동일 수량이 포함된 현탁액의 총괄 제거 효율과 세가지 크기 입자의 부피 평균인 $11.6\mu\text{m}$ 의 단일 입자크기의 현탁액의 경우와의 입자 제거효율 차이를 구하기 위하여 본 모델을 적용한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 여러 크기의 입자가 존재할 경우 특히 큰 입자가 존재할 경우에는 세공 입구에 부착된 큰 입자가 세공의 입구를 좁게함으로서 작은 입자들도 상대적으로 세공 또는 부착된 입자의 표면에 접촉할 기회를 증대시킴으로서 결과적으로 총괄 여과효율을 증대시킴을 알 수 있다. 본 모사조건에서 30% 정도의 여과효율 향상이 예측되나 입자가 너무 클 경우에는 일부 세공을 막게되고 이로 인하여 유체의 흐름을 중단되므로 여과효율이 감소될 수 있으나 충전여재의 단위부피당 침적된 입자의 부피가 작은 관계로 이러한 현상은 예측되지 않았다.

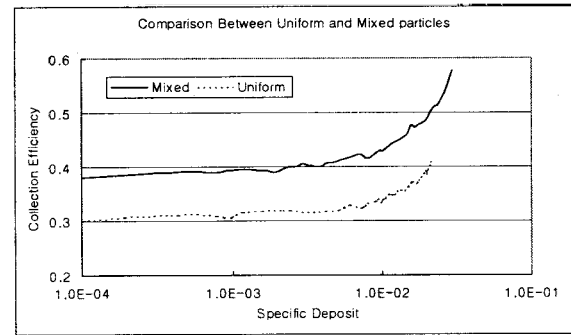


Fig. 9. Comparison between mono-dispersed and poly-dispersed particles

4. 결 론

여러 크기의 부유입자가 포함되어 있는 현탁액을 입상여과를 통하여 제거할 경우의 각각의 입자 제거 효율을 Unit Bed Element의 개념을 도입하여 수치 모사를 수행하여 조사하였다. 모사결과는 여러 입자가 혼합되어 있을 경우의 여과 효율은 단일 크기의 입자가 존재할 경우보다 총괄 제거 효율이 향상됨을 나타내었다. 이는 여과재 표면에 포집된 큰 크기의 입자가 추가적인 여과재의 역할을 하며 또한 세공을 좁게 함으로서 작은 입자가 여과재 표면과의 접촉기회를 증대시켜서 결과적으로 여과 효율이 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 기존에 제시된 단일 입자의 제거능력을 나타내는 모델을 이용함에 있어서 단순히 포함되어 있는 입자들의 부피 평균을 이용해서는 정확한 예측이 어려우며 입자 크기에 따른 상호간의 영향을 고려해야함을 알 수 있다.

본 연구에서는 3종류 크기의 입자들을 고려하였으나 실제 현장에서는 다양한 크기의 입자들을 포함하는 현탁액을 처리해야하는 경우가 많다. 따라서 본 연구결과를 적용하기 위해서는 부유입자들의 분포함수 형태를 구하여 입자 크기와 빈도수에 따라서 충전층에 공급되는 입자들의 크기를 결정할 수 있다. 분포함수에 따른 입자 크기가 결정되면 본 모델을 이용하여 충전층에 공급된 부유입자가 여과표면에

포집되는 가를 결정할 수 있으며 충분한 수의 부유 입자가 공급된후에는 총괄적인 여과 효율을 구할 수 있다. 그러나 동일한 농도의 현탁액의 경우 부유입자가 작은 경우에는 현탁액속에 포함되어 있는 입자가 많고 따라서 모사에 많은 계산시간이 필요한 단점도 있다. 본 연구에서는 입상여과 공정이 진행됨에 따른 여과 효율만을 살펴보았으나 일반 입상여과 공정에서의 중요한 운전변수인 압력손실의 변화를 함께 고려한 연구가 향후 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한성대학교의 교내연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Yao, K-M., M. T. Habibian, and C. R. O'Melia, "Water and Waste Water Filtration: Concept and Applications," *Environ. Sci., Technol.*, 5, 1105 (1971)
2. Spielman, L. A., and J. A. FitzPatrick, "Theory for particle Collection under London and Gravity Forces," *J. Colloid Inter. Sci.*, 42, 607 (1973)
3. Payatakes, A, C, R. Rajagoplan, and C. Tien, "application of Porous Media Model to the Study of Deep Bed Filtration," *Can. J. Chem. Eng.*, 52, 722 (1974)
4. Chang-upp Choo and C. Tien, "Simulation of hydrosol deposition in granular media," *AIChE J.*, 41, 1426 (1995)
5. Chang-upp Choo and C. Tien, "Analysis of the transient behavior of deep bed filtration," *J. of Colloid Inter. Sci.*, 169, 13 (1995)
6. Rege, S. D., and H. S. Fogler, "A Network model for Deep Bed Filtration of Solid Particles and Emulsion Drops," *AIChE J.*, 34., 1761 (1988)
7. Imdakm, A. O., and M. Sahimi, "Computer Simulation of Particle Transport Processes in Flow through Porous Media," *Chem. Eng. Sci.*, 46, 1977 (1991)
8. Veerapaneni, S., and M. R. Weisner, "Role of Suspension Polydispersivity in Granular Media Filtration," *J. Environ. Eng.*, 19, 172 (1993)