

응집제와 여과매체의 상호작용; Floc 여과를 위한 기초 연구

임성삼[†] · 권영두^{*}

인하대학교 환경공학과

^{*}동해대학 환경공학과

(2000년 8월 16일 접수, 2000년 9월 25일 채택)

The Influence of Flocculant to Filter Medium; Fundamental Study for Floc Filtration

Sung-Sam Yim and Young-Du Kwon^{*}

Department of Environmental Engineering, Inha University

^{*}Department of Environmental Technology, Tonghae College

(Received 16 August 2000; accepted 25 September 2000)

요 약

플록 여과의 기본 요건인 응집제와 여과매체의 상호작용을 알기 위하여 실험실에서 흔히 사용하는 세 가지 여과매체에 대하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 여과매체 자체에 대한 입자제거수의 투과실험을 수행하여 여과매체의 투과성질 및 특성을 구명하여 여과매체의 특성을 결정하는 방법을 제안하였다. 그 다음 응집제 용액의 여과실험 및 여과-투과실험을 수행하여 응집제와 여과매체의 상호관계를 연구하였다. 무기응집제 용액의 경우에는 여과매체의 공극의 크기가 큰 경우는 응집제의 씻김 현상이 관찰되었으며, 공극의 크기가 작은 경우에는 점착적인 막힘현상이 관찰되었다. 유기 고분자응집제 용액의 경우에는 여액이 전혀 통과하지 않는 여과매체의 막힘현상이 일어났다. 응집 후 여과가 이루어지는 경우에 빠른 조작을 위하여 고분자 응집제와 여과매체의 종류가 신중히 결정되어야 한다.

Abstract – To know the influence of flocculant on the resistance of filter medium, following experiments were performed for three types of filter media. The characteristics of filter medium were investigated with the permeation of particle eliminated water, and a new method for verifying the medium characteristics were also proposed. Then, the filtration and filtration-permeation for suspensions of inorganic and polymer coagulant were performed to study the influence of flocculant on the filter medium. The inorganic coagulant passed through or blocked the filter medium according to the pore diameter of filter medium. In the experiments with organic polymer solution, the filtration was no longer implemented due to the filter medium absolutely being clogged. It is suggested that the kind of flocculant and filter medium should carefully take consideration to have shorter operation time for a filtration following by coagulation.

Key words: Filtration, Cake Filtration, Filtration-Permeation, Coagulant, Filter Medium, Clogging

1. 서 론

케이이크여과의 이론이 정립되기 시작하면서 여과매체에 대한 연구가 간혹 이루어졌으나, 모든 연구가 제각기 서로 다른 관점에서 현상을 분석하였으므로 아직은 통일성 있는 이론적 체계가 이루어지지 못하였다.

그 원인은 첫째, Ruth[1]이후 Tiller[2, 3]로 이어지는 케이이크여과 이론에서 여과매체는 단지 케이이크를 받쳐주는(support) 역할을 할 뿐, 실제적인 여과는 케이이크에 의하여 이루어진다고 생각하여 여과매체의 역할에 큰 관심을 두지 않은 데 있다. 둘째, Ruth의 식에 의해 여과실험에서 측정되는 여과매체의 저항값인 R_m 은 여과 케이이크의 저항값인 여과 평균 저항값 α_w 와 단위 면적당 케이이크의 고체 질량 W 의 곱에 비해 대단히 작은 값으로 측정되므로 실제 케이이크여과의 속도에 거의 영

향을 미치지 않는다고 생각하여 왔기 때문이다[2]. 그러나 현장에서 근무하는 여과 기술자들은 여과매체에 따라 여과 진행 속도가 대단히 달라진다는 것을 잘 알고 있다.

여과매체의 저항값인 R_m 은 여과 진행 과정을 통해 변화하지 않는다고 간주되었으나 실험적으로 이 사실이 입증된 적이 없다. 저자[4]는 여과-투과방법으로 상기 내용을 검증하려 하였으나, 응집제로 응집시킨 화학적 플록의 여과에서 케이이크와 여과매체의 저항값의 합이 투과기간 중 감소하는 현상을 발견하였을 뿐이며, 아직까지 케이이크 여과 도중 여과매체 저항의 변화를 측정할 수 있는 정확한 방법이 개발되지 못하였다.

여과매체에 대한 연구가 진전하지 못한 세 번째 이유는 여과매체의 종류가 매우 다양하고 동일한 재료의 제품이라도 제조방법에 따라 특성이 매우 다른 경우가 있어 일관된 방법으로 분석하는 것이 매우 어려웠다는 데 있었다고 본다.

위의 첫 번째와 두 번째의 개념에도 불구하고 실제 현장과 실험실에

[†]E-mail: yimsungsam@inha.ac.kr

서의 케이크 여과 결과는 여과매체의 종류와 응집제의 종류, 그리고 응집제 농도에 따라 여과시간이 수백 배까지 변화하는 것이 사실이다. 본 연구에서는 여과매체와 응집제가 케이크 여과에 미치는 영향을 알기 위한 첫걸음으로 다음과 같은 주제를 다루었다.

여과매체의 성질을 간단한 방법으로 구명(究明)하기 위하여 두 가지 새로운 모델을 제안하였다. 하나는 흔히 실험실에서 사용하고 있는 섬유재질의 여과지에 대한 섬유상 여과매체 모델(fiber model)이며, 다른 하나는 우리의 개념상 여과현상을 잘 이해하게 할 수 있게 해주는 원기동형 세공 모델(pore model)이다. 이 방법은 Grace[5]와는 달리 여과매체를 구성하는 섬유 한 가닥의 평균 굵기, 혹은 여과매체를 구성하는 세공의 평균 직경을 계산할 수 있는 장점이 있다.

또한 무기 응집제 혹은 유기 고분자 응집제를 입자 제거수에 균일 분산시켜 여과현상과 여과-투과 현상을 살펴봄으로써 과량의 응집제가 여과에 미치는 영향을 추론해 봄은 물론, 대단히 작은 입자 즉 응집제와 여과매체의 상호관계를 구명(究明)하고자 하였다. 실제로 폐수처리나 그 밖의 산업적인 여과에서 여과 전에 여과 대상 슬러지를 응집-침전시키고 침전된 플러를 여과하여 여과속도를 빠르게 하는 방법이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 사용된 응집제가 여과에 미치는 영향은 이론적으로 명확히 구명되어 있지 않다. 본 연구의 응집제와 여과매체의 현상론적인 관계가 정립되면, 그 기본 개념이 응집시킨 플러의 여과 케이크 내부의 현상을 구명하는데 적용될 수 있으리라 생각한다.

2. 이 론

2-1. 여과 식의 이론적 배경

전(前) 세기가 시작되기 전부터 현재까지 여과현상을 표현하기 위하여 Darcy[6]의 식에서 유도된 다음 공식이 기본적으로 사용되고 있다.

$$q = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av}W + R_m)} \quad (1)$$

여기서, V 는 여과지 단위 면적당 여액의 부피(m^3/m^2), t 는 여과시간(s), Δp 는 여과압력(Pa), μ 는 여액의 점도($Pa \cdot s$), α_{av} 는 케이크의 여과 평균 비저항(m/kg), W 는 여과지 단위 면적당 케이크의 질량(kg/m^2), R_m 은 여과매체의 저항(m^{-1})이다.

S 를 여과 대상액 중의 고체분율(-), S_c 를 여과 케이크의 고체분율(-), 그리고 ρ 를 여액의 밀도(kg/m^3)라고 규정하면, 여과지 단위 면적당 여과 케이크의 질량 W 는 질량수지에 의해 식 (2)로 표현된다.

$$W = \frac{\rho S}{1 - S/S_c} V \quad (2)$$

만일 $W = CV$ 라고 정의하면, 여액 부피당 형성되는 여과 케이크의 질량 C 는 다음과 같이 표시된다.

$$C = \frac{W}{V} = \frac{\rho S}{1 - S/S_c} \quad (3)$$

식 (3)의 W 를 정리하여 식 (1)에 대입하고 분자와 분모를 바꾸어 놓으면

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{\Delta p} \alpha_{av} CV + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \div \frac{\Delta t}{\Delta V} \quad (4)$$

이며, 식 (4)를 적분하여 다시 정리하면 아래와 같이 된다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{2\Delta p} \alpha_{av} CV + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \quad (5)$$

이 식 (5)는 통상 parabolic equation이라 불리우며, 1917년 Sperry가 실험결과를 분석하여 이와 유사한 형태로 처음 제안[7]하였다.

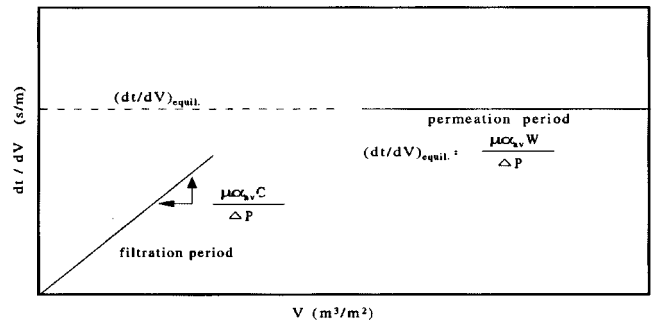


Fig. 1. Theoretical result of a filtration-permeation experiment.

2-2. 여과-투과(filtration-permeation) 실험방법

여과-투과(filtration-permeation)는 본 연구자가 개발한 새로운 실험방법으로 여과기간의 임의의 원하는 순간을 연장시켜 여과현상에 대한 자세한 연구를 가능하게 하였다[4]. 실험방법은 원하는 양의 현탁액 여과를 진행시킨 후 입자 제거수를 형성된 케이크에 투과시키는 것이다. 투과조작은 여과가 어느 정도 진행된 후에 수행하므로 투과기간에는 상당한 양의 케이크가 이미 형성되어 있다. 그러므로 식 (1)의 케이크에 의한 저항 $\alpha_{av} W$ 값이 여과매체의 저항 R_m 에 비해 대단히 커져 다음 식과 같이 R_m 값을 생략할 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu \alpha_{av} W} \quad (6)$$

이론적인 여과-투과 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1의 앞부분의 기울기를 가진 직선부분은 여과가 진행되는 기간이다. 이 직선의 기울기가 식 (4)의 $\mu \alpha_{av} C / \Delta p$ 를 나타내는 것이므로, μ , C , Δp 를 알면 여과 평균 비저항값 α_{av} 를 구할 수 있다. 이 여과 평균 비저항값은 여과기간에 얻어진 것이므로 $\alpha_{av,f}$ 로 표시한다.

Fig. 1의 뒷부분은 이미 형성된 케이크에 입자제거수가 투과하는 기간이므로 물의 투과 속도($\Delta V / \Delta t$)는 이론적으로는 항상 일정해야 한다. 이 일정한 값과 여과 후 측정된 여과지 단위면적당 케이크의 질량(W), 투과 조작시 압력(Δp), 액체의 점도(μ)를 식 (6)에 대입하여 투과 기간의 여과 평균 비저항값(α_{avp})을 구할 수 있다. 여과기간에 침전이나 그 밖의 여과 이외의 현상이 발생하지 않으면 $\alpha_{av,f}$ 와 α_{avp} 는 동일한 값을 가져야 한다.

2-3. 여과매체의 특성을 결정하는 새로운 실험방법

여과매체의 특성을 측정하는 방법은 여러 가지가 있으나 확고하게 인정되는 방법은 없다. 본 연구에서는 간단하고 빠르게, 그리고 실용적으로 여과매체의 특성을 측정할 수 있는 방법을 새로 제안한다. 이 방법은 여과매체에 입자제거수를 투과하여 투과속도로부터 여과매체의 평균 세공 크기(average pore diameter), 혹은 여과매체를 구성하고 있는 섬유의 평균 직경(average fiber diameter)을 계산하는 방법이므로 액체의 흐름과 직접 연관되며, 측정된 평균 세공의 크기와 fiber의 크기로 여과매체의 구조적인 특성을 규정할 수 있다.

2-3-1. 섬유상 여과매체 모델(fiber model)

실험실과 현장에서 흔히 사용되는 섬유재질의 여과매체의 구조는 일반적으로 Fig. 2와 같다.

입자제거수가 여과매체에 Δp 의 압력으로 투과될 경우 여과매체로 투과액이 다가오는 유속(공답속도)을 \bar{V}_0 라고 정의하면 여과매체 내부의 공극 사이를 흐르는 실제 유속(\bar{V})은 Kozeny-Carman식에서와 같이 공극을 개념을 도입하여 \bar{V}_0/ϵ 로 표시할 수 있다.

여과매체에서 섬유 전체 표면적($A_{s,f}$)은 길이(l), 직경(d_f)인 단위섬유의 개수(N_f)로 표현할 수 있고, 이 섬유 전체의 표면적($A_{s,p}$)이 액체의 흐름

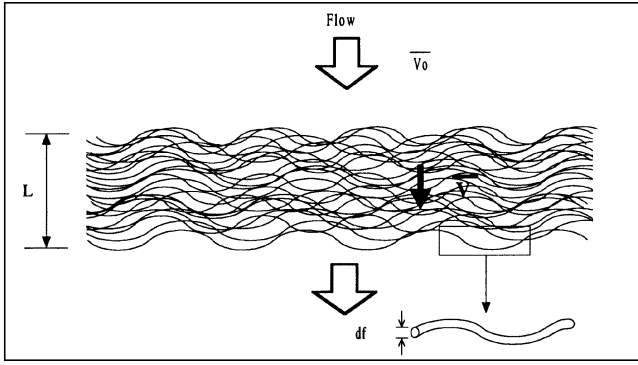


Fig. 2. Schematic diagram of a fiber model.

에 저항을 주는 직접적인 원인이 된다. 섬유 길이 \$l\$이 지름에 비하여 대단히 큰 경우가 일반적이므로 이 섬유 양단의 표면적 \$\pi d_f^2/4\$을 무시하면 한 섬유의 표면적(\$A_f\$)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$A_f = \pi d_f \times l \quad (7)$$

또한, 여과매체를 구성하는 섬유 전체의 표면적(\$A_{s,f}\$)은,

$$A_{s,f} = A_f \times N_f \quad (8)$$

이다. \$N_f\$는 전체 섬유의 개수이며, 이 값은 여과매체의 전체 고체부분의 부피를 한 섬유의 부피로 나누어 구할 수 있다. 여과매체의 면적을 \$S_0\$라 하면, 이 여과매체의 전체 고체부피는 \$S_0 L(1-\epsilon)\$이고 한 섬유의 부피는 \$\pi d_f^2/4 \times l\$이므로 전체 섬유의 개수는 다음과 같다.

$$N_f = \frac{S_0 L(1-\epsilon)}{\pi d_f^2/4 \times l} \quad (9)$$

그러므로 전체 섬유의 표면적은 다음과 같다.

$$A_{s,f} = \pi d_f l \times \frac{S_0 L(1-\epsilon)}{\pi d_f^2/4 \times l} = \frac{4(1-\epsilon)(S_0 L)}{d_f} \quad (10)$$

이 경우 수력학적 반경(hydraulic radius, \$r_H\$)은 정의에서 시작하여 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} r_H &= \frac{\text{물 흐르는 면적} \times \Delta L}{\text{물에 젖은 둘레} \times \Delta L} = \frac{\text{물 흐르는 곳의 부피}}{\text{물에 젖어있는 고체의 표면적}} \\ &= \frac{\text{물 흐르는 곳의 부피}}{A_{s,f}} = \frac{S_0 L \epsilon}{4(1-\epsilon)S_0 L/d_f} = \frac{\epsilon}{4(1-\epsilon)} \times d_f \end{aligned} \quad (11)$$

유체 역학의 기본식[8]에서 유체의 흐름에 의한 마찰력(drag force, \$F_D\$)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_D &= A_{s,f} \frac{k_i \mu \bar{V}}{g_c r_H} = \frac{4(1-\epsilon)S_0 L}{d_f g_c} k_i \mu \frac{4(1-\epsilon)\bar{V}_0}{\epsilon d_f} \\ &= \frac{16(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3 g_c} S_0 L \frac{k_i \mu \bar{V}_0}{d_f^2} \end{aligned} \quad (12)$$

이 힘이 흐름의 단면적 \$S_0\$의 빈 곳에 미치게 되므로, 흐름에 필요한 압력 \$\Delta p\$는

$$\Delta p = \frac{F_D}{\epsilon S_0} = \frac{16(1-\epsilon)^2 k_i \mu}{\epsilon^3 g_c} \frac{\bar{V}_0}{d_f^2} L \quad (13)$$

이다. 따라서 여과매체를 구성하는 섬유의 직경 \$d_f\$에 대하여 수식을 정리하면 다음과 같다.

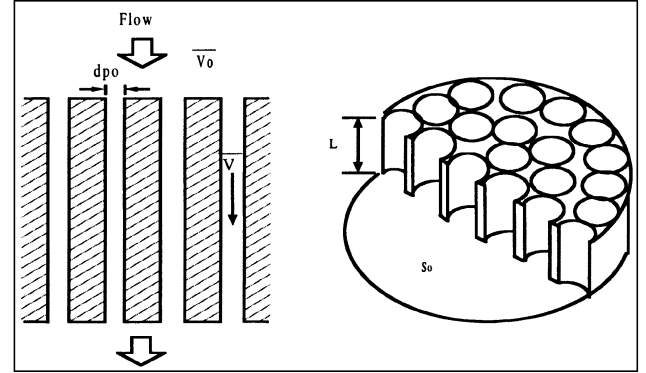


Fig. 3. Schematic diagram of a filter medium composed of homogeneous pores.

$$d_f^2 = \frac{16(1-\epsilon)^2 k_i \mu}{\epsilon^3 g_c} \frac{L \bar{V}_0}{\Delta p} \quad (14)$$

그러므로 \$\Delta p\$의 압력으로 여과매체에 입자제거수를 투과시켜 투과속도 \$\bar{V}_0\$를 측정하면, 여과매체의 두께(\$L\$), 공간율(\$\epsilon\$), 그리고 물의 온도로부터 구한 점도(\$\mu\$)에서 여과매체를 구성하는 섬유 한가닥의 평균직경(\$d_f\$)을 구할 수 있다.

여과매체 단위 면적당 섬유의 개수는 식 (9)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{N_f}{S_0} = \frac{4L(1-\epsilon)}{\pi d_f^2 \times l} \quad (15)$$

2-3-2. 원기둥형 세공 여과매체 모델(pore model)

본 실험에서 사용된 여과매체는 모두 섬유로 이루어진 것이나 섬유의 굵기나 단위 면적당 개수만으로는 여과현상과 직접 결부시키어 이해하는데 약간의 어려움이 있다. 그러므로 원기둥형 세공으로 구성된 여과매체에 대한 모델을 세웠으며 그 개략도는 Fig. 3과 같다.

섬유상 여과매체 모델과 동일한 방법으로 유도하면, 전체 세공의 개수(\$N_{po}\$)는

$$N_{po} = \frac{\text{filter medium의 빈 부분}}{\text{한 pore의 부피}} = \frac{S_0 L \epsilon}{\pi L d_{po}^2/4} \quad (16)$$

이고, 여과매체를 구성하는 평균 세공 크기(\$d_{po}\$)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_{po}^2 = \frac{16 k_i \mu}{g_c \Delta p} \frac{\bar{V}_0}{\epsilon} \quad (17)$$

그리고 단위 면적당 여과매체를 구성하는 세공의 개수는 다음과 같다.

$$\frac{N_{po}}{S_0} = \frac{4\epsilon}{\pi d_{po}^2} \quad (18)$$

실험에 의해 유체의 공급속도를 측정하고 여과매체의 공간율을 알면 위의 결과식들을 사용하여 여과지를 구성하는 섬유의 평균 직경과 개수, 또는 여과지를 구성하는 평균 세공 크기와 단위면적당 세공의 개수를 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 여과-투과 실험장치

본 연구에서는 통상적인 Büchner funnel의 중간 부분이 넓어지는 여

Table 1. Characteristics of filter media

Filter medium	Weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Retained diameter (μm)	Limits of pH (-)
ADVANTEC TOYO 5A	97	0.22	7.0	0-12
ADVANTEC TOYO 5C	118	0.22	1.0	
ADVANTEC GS 25	70	0.25	0.6	

과 셀 대신에 내경이 4.1 cm로 일정한 원통형 여과 셀(cell)을 사용하였다. 여과 도중 현탁액에서 침전되는 물질이 셀의 넓어지는 부분의 턱에 쌓이는 것을 방지하기 위함이다.

여액 수기(受器)는 아스피레이터와 연결되어 감압여과를 수행하며, 아스피레이터는 압력계와 40 L 부피의 공기 탱크와 연결시켰다. 여과 실험을 시작하기 전에 아스피레이터로 공기 탱크내의 공기를 배출시켜 장치를 감압하고, 압력계를 사용하여 압력을 조절한다. 원하는 압력이 이루어지면 아스피레이터를 멈추고 공기 탱크내의 감압으로 여과를 시작하여 진행시킨다. 이 방법으로 실험 도중 아스피레이터에 의한 압력의 변동(fluctuation)을 막고 균일한 압력 조건에서 여과를 수행할 수 있었다. 여과-투과에 의한 부피의 변동이 최고 400 mL이고 공기 탱크의 부피가 40 L이므로 여과 시작과 실험 종료와의 사이에 최고 1%의 압력 변화가 있다. 이 공기 탱크를 사용하는 방법은 본 연구실에서 개발된 것이다.

3-2. 여과매체와 시료

3-2-1. 여과매체

여과매체는 ADVANTEC 東洋濾紙株式會社(일본)에서 제조된 고순도의 셀룰로오스 재질의 여과지로 염산과 불화 수소산으로 복산처리된 것이다. 사용된 종류는 ADVANTEC TOYO 5A, TOYO 5C와 유리섬유재질의 ADVANTEC GS 25였다. 이들 제조 회사에서 제공된 자료에 의한 여과지의 특성은 Table 1과 같다[9].

3-2-2. 입자제거수와 여과 대상 현탁액

여과-투과 조작의 투과액과 현탁액의 제조에 입자제거수(particle removed water)를 사용하였다. 일반적으로 실험실에서 사용하는 역삼투(Reverse Osmosis)장치를 이용하여 여과시킨 물을 실험 시작 전에 0.45 μm와 0.2 μm의 공극을 가진 고분자 여과매체(membrane filter)에 감압 여과하여 사용하였다. 역삼투된 물을 보관하는 과정에서 다른 입자의 혼입(混入)을 염려한 때문이었다.

여과 대상액으로 응집제 용액을 사용했을 경우 다음과 같이 제조하였다. 먼저 무기응집제 FeCl₃를 칭량하였다. 표준 전단력 교반기로 입자제거수를 300 rpm으로 교반하면서 칭량된 FeCl₃를 소량씩 투입하면서 약 2분에 걸쳐 균일하게 분산시켰다. 그 후 500 rpm으로 30분, 2시간, 4시간씩 교반하여 사용하였다. 유기 고분자 응집제인 송원산업주식회사의 SC-050은 교반시간을 1시간으로 하여 제조하였다.

3-3. 실험방법

3-3-1. 여과매체의 투과실험

실험시작 전에 실험장치의 연결 부위에 공기가 새어 들어가지 않도록 테프론 테이프로 밀폐시킨다. 입자 제거수는 실험조작 전에 만들어 사용하고 오랜동안 보관하지 않도록 한다.

여과매체의 저항 R_m을 구하기 위하여 측정하고자 하는 여과매체를 다공성의 받침대(support) 위에 놓고 3.7×10² Pa(3.8 cmH₂O) 또는 7.4×10² Pa(7.5 cmH₂O)의 낮은 압력으로 입자 제거수를 투과시켜 투과속도를 측정한다.

앞으로 실험할 입자제거수의 투과실험과 현탁액의 여과-투과 실험에 여과매체 받침대가 미치는 영향을 알아보기 위하여 여과매체 없이 받

침대만으로 3.7×10² Pa (3.8 cmH₂O)의 압력으로 입자제거수의 투과실험을 수행하였다.

3-3-2. 응집제의 여과실험 및 여과-투과실험

응집제의 여과 성질을 알기 위해 무기응집제인 1 wt% FeCl₃ 용액 400 mL를 TOYO 5A와 TOYO 5C를 사용하여 1.0×10⁴ Pa의 압력으로, GS 25는 7.4×10² Pa의 압력으로 여과를 수행하며 여액의 부피와 시간을 측정하였다.

여과-투과실험을 위해 무기응집제 1 wt% FeCl₃ 용액 400 mL을 여과한 다음 입자제거수 400 mL를 투과시켰다. TOYO 5A, TOYO 5C, GS 25를 사용하여 여과실험과 동일압력으로 실험하였다. 유기 고분자 응집제 SC-050 0.01 w/w%를 TOYO 5A를 사용하여 5.1×10⁴ Pa 압력으로 위와 동일한 실험을 진행하였다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 여과매체의 투과실험

여과매체의 기본적인 성질을 알기 위해 입자 제거수를 사용하여 3.7×10² Pa 및 7.4×10² Pa의 낮은 압력에서 각각의 여과매체에 대하여 투과액 200 mL를 투과실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 실험에서 입자 제거수 200 mL(V 값으로는 16.3 cm)를 투과하는데 걸린 시간이 TOYO 5C가 2,223초, TOYO 5A가 417초, GS 25가 267초로 측정되었다. 투과시간이 TOYO 5A를 기준으로 할 때 TOYO 5C는 약 5.3배 더 걸렸으며, GS 25는 약 0.6배로 빠르게 투과되었다. 압력을 두 배 높인 결과로도 동일한 경향이 나타났다.

여과매체의 저항은 이 실험결과와 Ruth의 식인 식 (1)에서 구할 수 있다. 투과되는 대상액이 입자 제거수이므로 여액 부피당 형성되는 여과 케이크의 질량인 W값은 없다. 식을 재정리하면 여과 시간 t는 $\mu R_m V / \Delta p$ 가 된다. 또한 위의 그래프의 기울기는 t/V가 되며, 그 값은 $\mu R_m / \Delta p$ 가 된다. 위의 모든 그래프는 거의 직선이므로 그래프로부터 얻은 기울기를 대입하여 여과매체의 저항인 R_m값을 구하여 Table 2에 나타내었다.

여과매체 받침대(filter support)의 저항은 9.8×10⁷ m⁻¹로 일반적인 여과매체의 저항값인 10⁹-10¹⁰ m⁻¹에 비하여 상당히 작은 값이며, 세 가지 여과매체 중 가장 작은 GS 25의 14%정도로 여과매체의 분석에 크게 영향을 미치지 않는다고 판단한다. 투과시간이 가장 긴 TOYO 5C의 저항 값이 3.7×10² Pa의 압력에서 4.7×10⁹ m⁻¹으로 가장 컸다. TOYO 5A

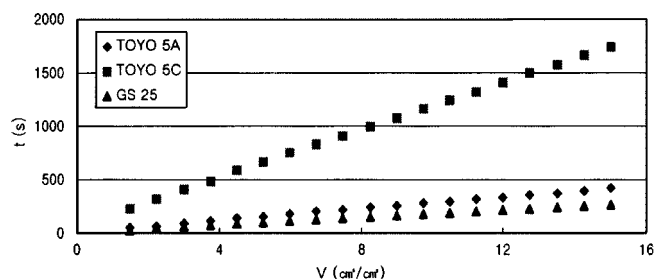


Fig. 4. The permeation results of particle eliminated water through various filter media at 3.75×10² Pa.

Table 2. The R_m values of various filter media

Pressure	R _m (m ⁻¹)	
	3.7×10 ² Pa	7.4×10 ² Pa
ADVANTEC TOYO 5A	1.0×10 ⁹	1.3×10 ⁹
ADVANTEC TOYO 5C	4.7×10 ⁹	6.2×10 ⁹
ADVANTEC GS 25	7.1×10 ⁸	8.3×10 ⁸

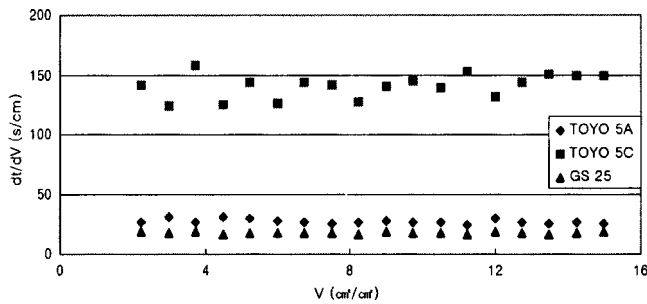


Fig. 5. Permeation of particle eliminated water through filter media at 3.7×10^2 Pa.

를 기준으로 TOYO 5C는 TOYO 5A의 약 4.7배 큰 값이며, GS 25는 TOYO 5A의 약 0.7배 작은 값이다. 이 차이는 여과매체를 구성하는 섬유 두께의 차이, 여과매체의 공간율과 두께에 기인한다고 생각할 수 있다. 얇은 두께의 섬유로 이루어진 여과매체일수록, 작은 공간율을 가진 것일수록, 또한 두꺼운 것일수록 더 큰 매체저항을 가진다.

투과압력이 두배로 증가함에 따라 R_m 값은 TOYO 5A가 1.25배, TOYO 5C가 1.31배, GS 25가 1.17배로 증가하였다. 이는 압력이 증가함에 따라 여과매체를 구성하는 섬유가 더 많이 눌러 공간율이 감소한 결과라고 생각할 수 있다.

여과곡선과의 명확한 비교를 위해 Fig. 4의 y축의 값을 시간 t(s)에서 $\Delta t/\Delta V$ (s/cm)로 변경하여 나타낸 것이 Fig. 5이다.

일정한 기울기를 나타내는 일반적인 여과실험결과와는 달리, V에 따른 dt/dV 의 값이 거의 변하지 않고 x축에 평행하게 나타났다. 이는 실험에 사용된 투과수가 여과실험에 영향을 주지 않을 정도로 입자가 제거된 것으로 보아도 무방하다는 것을 나타낸다. 만일 투과수에 입자가 포함된 경우라면 그것이 여과매체에 걸려 일정한 기울기를 갖는 케이크 여과 형태의 그래프로 나타나야 하기 때문이다.

TOYO 5A와 GS 25를 사용한 실험결과는 dt/dV 값이 거의 완전한 수평에 가까운 정도로 실험초기와 후기가 거의 같은 값으로 측정되었으나, TOYO 5C의 실험결과는 투과가 진행됨에 따라 dt/dV 값의 변화가 비교적 심하였다.

Fig. 5에서 TOYO 5A와 GS 25의 경우 투과 유속의 변화가 없는 것은 투과수에 입자가 없고 여과매체의 구조적인 변화가 없다면 당연한 결과일 것이다. 그러나 현탁액의 여과에서는 여과시작과 함께 여러 가지 변수가 수반되는데, 예를 들면 여과도중 여과 대상액 안의 입자의 침전[10, 11]이라든가, 작은 입자가 케이크나 여과매체 내부에 부착되는 것, 그리고 케이크 내에서 미립자의 움직임[12], 그리고 여과시간이 길어짐에 따라 여과매체 재질의 팽윤으로 인한 공간율의 감소로 인하여 여과초기의 여과매체 상태와 여과과정 전체를 통한 여과매체의 상태가 달라질 수 있을 가능성이 있다.

여과매체의 특성을 수치화하기 위해 제안된 섬유상 여과매체 모델(fiber model)과 원기둥형 세공 여과매체 모델(pore model)로부터 위의 실험값에서 계산한 각각의 여과매체 구성섬유의 직경(d_f)과 세공의 크기(d_{po})는 Table 3과 같다.

원기둥형 세공 여과매체 모델에 의한 TOYO 5A, TOYO 5C, GS 25의 세공의 직경이 각각 $3.3 \mu\text{m}$, $1.3 \mu\text{m}$, $4.4 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. TOYO 5A와 TOYO 5C의 세공의 직경은 회사에서 제공한 포획 가능 입자 크기(retained diameter)와 비교하여 유사한 경향을 나타내지만, GS 25는 상당한 차이를 보인다. 그러나 여과매체 제조회사에서 제공된 입자를 보류할 수 있는 능력을 나타내는 포획 가능 입자 크기는 본 연구에서의 목적과 개념이 다르므로 이 값이 d_{po} 와 완전히 일치할 수는 없다고 생각한다.

Table 3. The pore diameter(d_{po}) and fiber diameter(d_f) of filter medium calculated by our models

Filter medium	Retained diameter (μm)	d_{po} (μm)	d_f (μm)
ADVANTEC TOYO 5A	7.0	3.3	1.2
ADVANTEC TOYO 5C	1.0	1.3	0.49
ADVANTEC GS 25	0.6	4.4	0.27

섬유상 여과매체 모델에 의한 구성섬유 한가닥의 직경은 TOYO 5A가 $1.2 \mu\text{m}$, TOYO 5C가 $0.49 \mu\text{m}$, GS 25가 $0.27 \mu\text{m}$ 로 계산되었다. 셀룰로오스 재질인 TOYO 5A는 동일재질의 TOYO 5C의 직경보다 약 2.4배 굵은 섬유로 구성되어 있으며, 직경이 2.4배인 것은 구성 섬유의 단면적으로 약 5.8배의 굵기를 가진 섬유를 의미한다. 유리섬유 재질인 GS 25의 직경이 TOYO 5A보다 약 4.3배 작는데, 이는 TOYO 5A보다 18.5배의 가는 섬유로 구성되어 있다고 볼 수 있다.

또한 여과매체의 두께가 0.22 mm 인 TOYO 5A의 단위면적당 질량은 97 g/m^2 , 동일재질인 TOYO 5C가 118 g/m^2 이다. 여과매체의 두께가 0.25 mm 인 유리섬유재질인 GS 25는 70 g/m^2 으로 가장 작게 나타났다. 이것은 동일재질(셀룰로오스)의 TOYO 5C가 TOYO 5A에 비해 22% 정도 여과매체내 섬유가 더 채워져 여과매체내 공간율이 감소하였다고 볼 수 있으며, 재질이 다른 유리섬유재질의 GS 25는 TOYO 5A와 TOYO 5C에 비해 두꺼우면서 유리섬유재질이 채워진 상태(밀도차이에 의해 다소 차이가 나겠지만)는 TOYO 5A에 비해 상당량 적게 채워져 있다고 분석된다. 이로 인해 입자제거수의 투과실험에서 GS 25 여과매체가 작은 직경의 유리섬유로 이루어져 있으면서도 투과속도가 가장 빨랐다고 분석할 수 있다.

이와 같이 TOYO 5C는 TOYO 5A에 비해 가는 섬유로 구성되어 있으며, 여과매체 내의 섬유가 더 뭉뚱히 채워져 있기 때문에 입자를 보류할 수 있는 능력이 대단히 우수하며, 원기둥형 세공 여과매체 모델로부터 측정된 세공의 크기도 작게 측정되었다.

그러나 GS 25는 회사에서 제공된 포획 가능 입자 크기(retained diameter)에 의하면 오히려 가장 작은 입자까지 보류할 수 있는 것으로 나타나 있는데, 이것은 GS 25가 다른 여과매체와 비교해 두께가 두껍고 가는 섬유로 구성되어 있기 때문에 세공의 크기가 크게 계산되었음에도 불구하고 작은 입자까지 포획할 수 있을 가능성이 있을 수 있다.

4-2. 응집제의 여과실험; 교반 시간

응집제의 기본적인 성질을 알기 위해 다음과 같은 실험을 하였다. 입자제거수에 무기응집제만을 넣고 표준전단력 교반기로 300 rpm 에서 2분 동안 교반한 후, 500 rpm 에서의 교반시간을 30분, 2시간, 4시간으로 달리하며 $1.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ 의 압력으로 여과실험한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 케이크여과 현상과는 다른 형태를 나타내는데, 이는 여과매체 TOYO 5A에 응집제 FeCl_3 가 통상적인 케이크로서 작용하지 않은 것

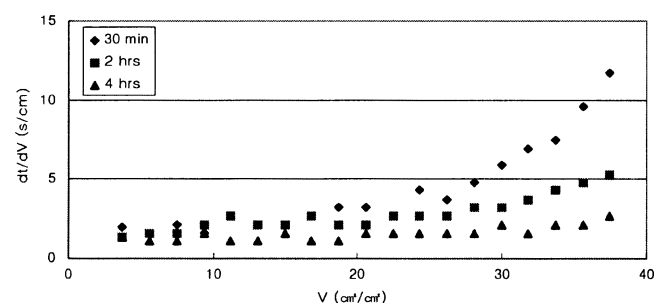


Fig. 6. Filtration results of 1 wt% FeCl_3 solution at 1.0×10^4 Pa with varying agitation time(ADVANTEC TOYO 5A).

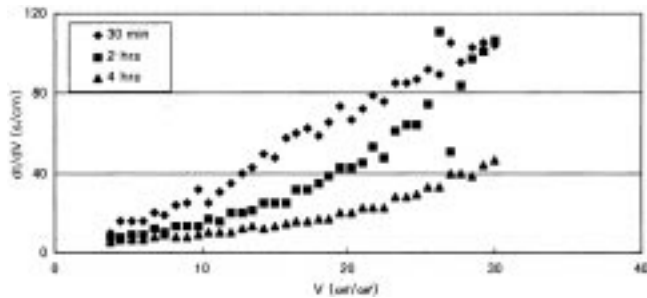


Fig. 7. Filtration results of 1 wt% FeCl_3 solution at 1.0×10^4 Pa with varying agitation time (ADVANTEC TOYO 5C).

을 의미한다.

FeCl_3 는 용액중에서 무기 고분자 물질을 형성한다. 형성된 고분자 물질은 30분 정도의 교반으로는 완전히 분산되지 않고 서로 얽힌 상태로 존재하여 어느 정도의 크기를 가진다고 가정할 수 있다. 이 크기는 여과지의 세공에 비하면 상당히 작아 처음에는 여과지를 그대로 통과한다. 그러나 여과가 계속되면 여과지의 세공의 벽에 붙는 응집체가 많아져 나중에는 TOYO 5A 정도로 세공이 넓은 여과매체에서도 여과속도가 떨어져 dt/dV 의 값의 증가가 관측되고 있다.

그러나 4시간 정도 교반한 용액에서는 모두가 잘 분산되거나, 혹은 긴 고분자 사슬이 잘려 여과매체에 걸리는 것이 거의 없게 된다. FeCl_3 를 사용할 때 여과매체에 걸리지 않는 정도까지 분산시키려면 4시간이나 걸린다는 사실은 통상적인 개념으로는 생각하기 어려운 점이다. 이 그래프의 뒤의 증가부분을 사용하여 여과평균 비저항값을 계산한다는 것은 별 의미가 없다.

TOYO 5C를 사용하여 TOYO 5A와 동일한 조건에서 여과실험을 한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

TOYO 5C는 TOYO 5A와는 달리 케이크여과의 실험결과 형태를 나타내고 있다. 교반시간 30분의 경우 여과 평균 비저항값은 3.2×10^{10} m/kg이며, 여과매체의 저항은 1.2×10^9 m⁻¹이다. 형성된 무기 고분자 물질이 처음부터 여과매체에 의해 포획되어 케이크의 형태로 쌓이거나 여과매체 내의 세공을 점차로 막는다고 생각할 수 있다. 여과매체에 의해 포획되는 입자는 TOYO 5A를 쉽게 통과하나 TOYO 5C는 거의 통과할 수 없는 크기라고 생각할 수 있다. 이런 종류의 응집체를 사용할 때는 여과매체의 선정이 중요하다고 판단한다. 교반시간이 증가함에 따라 dt/dV 의 증가율이 점점 작아지는 것은 교반에 의해 무기 고분자 물질의 크기가 점차 작아짐을 의미한다. GS 25로 실험한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

TOYO 5A, TOYO 5C와 동일 조건에서 여과실험을 진행하려고 했으나, 여과압력 1.0×10^4 Pa에서 여과속도가 너무 빨라 실험 데이터를 측정하는 것이 불가능하여 여과압력을 7.4×10^2 Pa로 압력을 낮추어 실험하였다. 이것은 앞의 실험과 비교해 여과압력을 1/14로 낮추어 실험한 것이며, dt/dV 의 크기는 약 2배정도 크게 나타내었다. 이 결과를 전형적인 케이크 여과 그래프로 보기는 어려우며 전반적으로 TOYO 5A와 비슷한 경향을 보인다.

Table 4. The average specific filtration resistance of 1 wt% FeCl_3 solution at different agitation times (ADVANTEC TOYO 5C)

Agitation time (hr)	Average specific filtration resistance (m/kg)	Filter medium resistance (m ⁻¹)
0.5	3.199×10^{10}	1.185×10^9
2.0	1.777×10^{10}	2.369×10^9
4.0	1.185×10^{10}	3.554×10^9

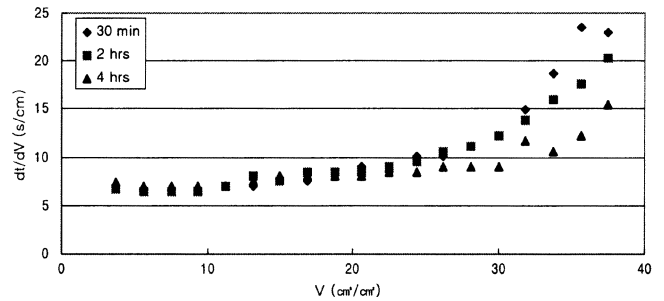


Fig. 8. Filtration results of 1 wt% FeCl_3 solution at 7.4×10^2 Pa with varying agitation time (ADVANTEC TOYO 5A).

GS 25는 회사에서 제공된 포획 가능 입자 크기(retained diameter)에 의하면 오히려 가장 작은 $0.6 \mu\text{m}$ 크기의 입자까지 포획할 수 있는 것으로 나타나 있는데 우리의 모델에 의하면 세공의 지름이 $4.4 \mu\text{m}$ 로 다른 여과매체에 비해 가장 크다. 현재 응집제로 실험한 결과로는 TOYO 5C에 걸리는 현재의 실험 대상 입자가 GS 25에는 거의 모두 통과하고 있다. 또한 TOYO 5A보다도 더 잘 통과시키고 있다. 그러므로 제조회사에서 제공한 포획 가능 입자 크기를 입자의 세공의 크기와 같다고 생각해서는 안된다고 본다.

4-3. 무기응집제의 여과-투과실험

TOYO 5A와 TOYO 5C의 여과-투과실험은 1.0×10^4 Pa의 압력에서 1 wt% FeCl_3 용액을 500 mL 여과한 다음 이어서 입자 제거수를 500 mL 투과시켰으며, 그 결과를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 실제적으로는 여과와 투과가 이어지도록 여과가 종료되기 전에 입자 제거수를 넣기 시작하였다.

TOYO 5A로 실험한 Fig. 9에서 V값이 $40 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 이하인 dt/dV 의 값이 계속 증가하는 부분이 여과기간이고, dt/dV 의 값이 일정한 값에 도달하여 계속되는 부분이 투과기간이다. 여과초기의 dt/dV 값은 일정하

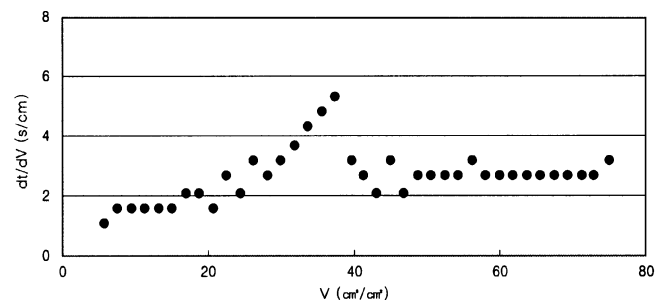


Fig. 9. Filtration-permeation result of 1 wt% FeCl_3 solution at 1.0×10^4 Pa (ADVANTEC TOYO 5A).

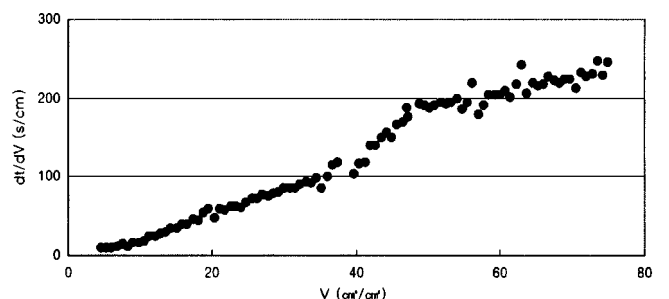


Fig. 10. Filtration-permeation result of 1 wt% FeCl_3 solution at 1.0×10^4 Pa (ADVANTEC TOYO 5C).

다가 약간 진행된 후부터 직선적인 증가를 보이고 있다. 이것은 여과 초기에는 대부분의 응집제가 여과매체를 통과하며, 여과가 진행됨에 따라 입자들이 여과매체의 세공 내에 서서히 부착한다. 그 후 여과와 마찬가지로 dt/dV 값의 직선적인 증가가 관찰되는 때는 응집제로 인해 좁아진 세공 위에 응집체들의 케이크 여과가 일어난 것, 혹은 세공 내에 상당한 정도로 응집제가 부착하는 것으로 해석할 수 있다.

여과과정이 끝나고 바로 입자제거수의 투과가 이루어지면 dt/dV 가 급격히 감소한다. 이는 여과과정에서 여과매체의 세공에 쌓여있는 상당량의 응집제가 입자 제거수에 씻겨 나가고 일부 응집제만 남아 여과초기의 값보다는 다소 큰 일정한 값을 유지하는 것이라고 해석하였다.

여과기간의 여과 평균 비저항값인 α_{avf} 는 9.1×10^8 m/kg이고, 투과기간의 비저항인 α_{avp} 는 6.7×10^8 m/kg으로 26% 정도 작은 값이다.

TOYO 5C로 실험한 결과인 Fig. 10에서는 TOYO 5A의 경우와는 달리 초기부터 일정한 기울기를 가지면서 dt/dV 가 계속 증가한다. 이것은 전형적인 케이크 여과 실험의 결과와 동일한 유형이다. 이 여과매체는 앞의 것보다 작은 세공으로 구성되어 있으므로 통상적인 분석으로는 초기부터 케이크 여과가 이루어졌다고 볼 수 있다. 그러나 투과 기간에도 거의 같은 기울기로 dt/dV 가 계속 증가하는 것으로 보아 처음부터 세공이 계속 막혀가는 과정이 우연히 여과와 동일한 현상으로 측정되었을 가능성도 배제하지 못한다. 또한 처음에는 케이크 여과가 진행되고, 투과 기간에 작은 응집제의 이동으로 여과매체의 세공이 계속 막혀가는 기작으로 분석할 수도 있다.

여과기간의 α_{avf} 는 3.6×10^{10} m/kg으로 TOYO 5A와 비교해 40배정도 큰 값이며, 투과기간의 α_{avp} 의 값은 dt/dV 값이 평형을 유지하지 않은 관계로 구할 수 없었다.

GS 25는 7.4×10^2 Pa의 압력에서 여과-투과실험을 하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다. 여과기간의 여과 평균 비저항값인 α_{avf} 는 2.0×10^7 m/kg이고, 투과기간의 비저항인 α_{avp} 는 1.9×10^7 m/kg이며 전체적인 경향은 TOYO 5A와 유사하다.

4.4. 유기고분자 응집제의 여과-투과실험

무기응집제와 비교하기 위해 유기 고분자응집제인 송원산업주식회사의 SC-050 0.01 wt% 용액을 TOYO 5A를 사용하여 250 mL 여과한 후 연이어 250 mL 입자제거수의 투과실험을 한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. TOYO 5A의 무기 고분자응집제의 여과-투과와 동일한 압력에서는 흐름이 거의 일어나지 않았으므로 압력을 5.1×10^4 Pa로 높여 실험을 진행하였다.

Fig. 12는 전형적인 여과곡선이 아니므로 여과 평균 비저항값을 구하는 의미가 없다. 그러나 앞의 실험보다 여과-투과압력이 5배 크며, dt/dV 값은 약 20배 증가하였고, 여과대상액의 농도를 무기응집제의 경우의 1/100로 실험한 점들을 고려하여 대략적으로 평가하면, 유기 고분자응집제는 실험에 사용한 $FeCl_3$ 용액에 비하여 약 10,000배 큰 10^{13} m/kg의 여과 평균 비저항값을 가진다고 생각할 수 있다. 무기응집제의

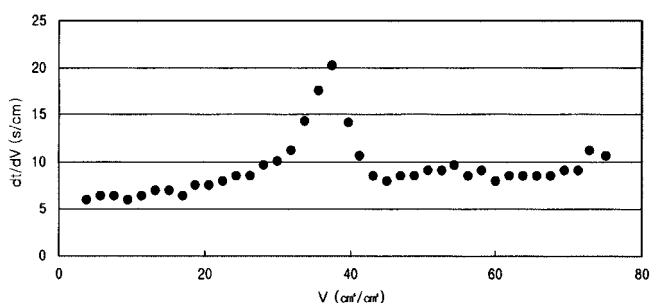


Fig. 11. Filtration-permeation result of 1 wt% $FeCl_3$ solution at 7.4×10^2 Pa(ADVANTEC GS 25).

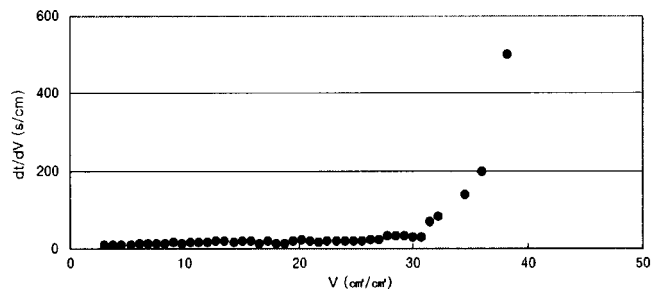


Fig. 12. Filtration-permeation result of SC-050 0.01 wt% solution at 5.1×10^4 Pa(ADVANTEC TOYO 5A).

여과-투과 결과와는 달리 여과기간에 dt/dV 의 계속적인 증가를 보이며, V가 $20 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 이후 투과기간 초기에도 거의 같은 비율로 증가한다. 그러나 그 후 갑자기 dt/dV 가 급격히 증가하고, 드디어 여액이 전혀 투과되지 않게 되었다. 이것은 여과매체나 케이크의 막힘현상(clogging phenomena)이 일어난 것이다. 동일한 TOYO 5A를 이용한 무기응집제의 여과-투과에서는 입자제거수의 투과시 무기응집제가 씻겨 나가는 씻김현상(washing phenomena)이 일어났는데 이와는 반대되는 현상이다. 무기응집제를 사용한 TOYO 5C의 실험에서는 투과기간에 dt/dV 가 계속 증가하기는 했지만 여과매체가 막히는 현상은 일어나지 않았다.

따라서 유기 고분자응집제를 과량 사용하여 어느 정도의 응집제가 응집에 사용되지 않고 액 내에 남아 있을 경우 여과매체를 막아 여과속도를 늦출 수 있고, 결국에는 막히는 결과를 초래할 가능성이 있다. 그러므로 유기 고분자응집제를 사용하기 위해서는 가장 먼저 응집제가 여과매체에 어느 정도의 비저항값을 갖는지를 결정하는 것이 중요하다고 본다.

5. 결 론

응집제와 여과매체의 상호작용을 알기 위하여 세 종류의 여과매체를 사용하여 여과매체 자체(clean medium)만을 이용한 입자 제거수의 투과실험, 무기응집제 $FeCl_3$ 용액과 유기 고분자응집제 SC-050 용액의 여과실험 및 여과-투과실험으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째 본 연구에서 제안된 원기동형 세공 여과매체 모델(pore model)과 입자제거수의 투과실험에서 TOYO 5A, TOYO 5C, GS 25의 세공의 직경이 각각 3.3, 1.3, $4.4 \mu\text{m}$ 로 계산되었고, 섬유상 여과매체 모델(fiber model)과 투과실험에서 구한 섬유 한가닥의 직경은 각각 1.17, 0.49, $0.27 \mu\text{m}$ 였다. 즉 입자 제거수의 투과실험과 여과매체의 공간율로 여과매체를 구성하고 있는 세공의 평균 직경, 단위 면적당 세공의 개수, 그리고 여과매체를 구성하고 있는 섬유의 평균 직경을 계산할 수 있었다. 둘째, 무기응집제 $FeCl_3$ 1 wt% 용액의 여과실험에서 TOYO 5C는 어느 정도의 기울기를 갖는 직선 형태의 그래프를 나타내어 전형적인 케이크 여과 현상을 보이며, TOYO 5A와 GS 25는 V값에 따라 dt/dV 의 증가가 아주 작아 상당량의 응집제가 여과매체를 빠져 나가는 현상을 보였다. 또한 교반시간이 증가함에 따라 α_{avf} 값이 감소하였다. 셋째, 무기응집제의 $FeCl_3$ 1 w/w% 용액의 여과-투과실험에서 TOYO 5A와 GS 25는 여과가 끝난 후 투과가 시작되면서 dt/dV 값이 급격히 떨어지는 현상, 즉 응집제가 여과매체를 빠져 나가는 씻김현상(washing phenomena)을 보였으며, TOYO 5C는 투과과정에서 dt/dV 값이 계속 증가하는데 이것은 케이크나 여과매체내에서 응집제의 이동(migration)으로 좁은 pore를 계속 더 좁혀서 나타난 현상 혹은 응집제에 대한 케이크 여과가 일어난 결과라고 생각한다. 넷째, 유기 고분자응집제의 여과-투과에서 α_{avf} 가 대략 10^{13} m/kg 이상으로 추정되는데 이는 무기응집제에 비해 약 10,000배 이상의 큰 값이며, 실험도중 여액이 전혀 투과되지

않는 여과매체의 막힘현상(clogging phenomena)이 일어났다. 유기 고분자응집제를 사용하기 위해서는 응집제가 여과매체에 어느 정도의 비저항을 갖는지를 검토해야만 할 것이다.

감 사

본 연구는 1999년도 인하대학교 서해 연안 환경 연구센터(RRC) 연구비로 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

사용기호

k_l	: coefficient in Eq. (12) [-]
Δp	: filtration pressure [Pa]
R_m	: resistance of filter medium [m^{-1}]
S	: mass fraction of solids in suspension which enters into a filter cake [-]
S_c	: mass fraction of solids in cake [-]
S_0	: surface area of filter medium [m^2]
t	: time for filtration [s]
V	: filtrate volume per unit filter area [cm^3/cm^2]
W	: dry cake mass per unit filter area [kg/m^3]

그리스 문자

α_{av}	: average specific cake resistance [m/kg]
α_{avf}	: average specific cake resistance by filtration [m/kg]
α_{avp}	: average specific cake resistance by permeation [m/kg]

μ	: viscosity of filtrate [kg/ms]
ρ	: density of filtrate [kg/m^3]

참고문헌

1. Ruth, B. F.: *Industrial and Engineering Chemistry*, **38**(6), 564(1946).
2. Tiller, F. M. and Cooper, H. R.: *AIChE J.*, **6**(4), 565(1960).
3. Tiller, F. M. and Cooper, H. R.: *AIChE J.*, **8**(4), 445(1962).
4. Yim, S. S.: *Vth World Filtration Congress*, 91(1990).
5. Grace, H. P.: *Chem. Eng. Progr.*, **49**, 303(1953).
6. Darcy, H. P. G.: "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon," Victor Dalmont, Paris(1856).
7. Sperry, D. R.: *Chem. Met. Eng.*, **17**, 161(1917).
8. McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P.: "Unit Operation of Chemical Engineering," fifth edition, McGraw-Hill Book Co.(1995).
9. アドバンテック東洋濾紙株式会社(日本), "ADVANTEC綜合カタログ," **46**, 28(1989).
10. Yim, S. S. and Kwon, Y. D.: *Proceedings of the 4th Japan-Korea Symposium on Separation Technology*, Tokyo, Japan, 781(1996).
11. Yim, S. S. and Kwon, Y. D.: *Proceedings of the 3rd China-Japan International Conference on Filtration Sedimentation*, Wuxi, P. R. China, 207(1997).
12. Yim, S. S., Kwon, Y. D. and Lee, Y. S.: *Proceedings of the 2nd China-Korea Conference on Separation Science and Technology*, Qingdao, P. R. China, 24(1998).