

여과-투과 방법의 이론적, 실험적 응용에 대한 연구

송연민 · 임성삼[†]
인하대학교 환경공학과

(2007년 12월 10일 접수, 2007년 1월 14일 채택)

Study on the Theoretical and Experimental Application of Filtration-Permeation Method

Yun Min Song · Sung Sam Yim[†]

Department of Environmental Engineering, Inha University

ABSTRACT : Using an experimental method named filtration-permeation, the influence of sedimentation during filtration was studied for the suspensions composed of particles and that of flocs. The average specific cake resistances measured by filtration do not give accurate values because of the sedimentations during filtration, but the permeation data give quite accurate values. The prolonged permeation rates for the cake formed from particulate suspension do not change, but that rate from the floc filtration changes by the sweeping of flocculant. It is proposed that the cake compressibility can be measured with one set of filtration-permeation experiment by step increase of pressure during permeation period. The another experimental method which can shorten experimental time for floc filtration using filtration-permeation is also proposed.

Key Words : Cake Filtration, Filtration-permeation Method, Average Specific Cake Resistance, Filtration with Sedimentation, Permeation, Compressibility

요약 : 본 연구에서는 새로운 여과-투과(filtration-permeation) 실험 방법을 사용하여 여과실험에 영향을 미치는 인자 중 침전에 대한 영향을 입자현탁액과 플러현탁액에 대해 각각 수행하였다. 그 결과 여과실험으로는 정확한 평균 비저항값을 예측할 수 없었으나, 투과실험으로 정확한 평균 비저항값을 측정할 수 있었다. 투과시간을 연장하였을 때 입자현탁액에서 형성된 케이크에서는 투과속도에 별다른 영향이 없었으나 플러현탁액의 경우는 응집제의 쓸러나감 현상을 보였다. 또한 여과-투과 실험을 사용하여 투과시에 단계적으로 압력을 증가시킴으로써 단 한번의 실험에 의해 케이크의 압축성이 측정되어 질 수 있음을 보였으며, 이 방법을 응용하여 평균 비저항값이 큰 활성슬러지의 긴 여과시간을 짧게 줄여 측정하는 새로운 방법을 제안하였다.

주제어 : 케이크 여과, 여과-투과 실험방법, 침전을 수반하는 여과, 케이크 평균 비저항, 투과, 압축성

1. 서론

오랫동안 여과 케이크는 여과기간 동안 여과매체 위에 형성된 입자라고 정의하였다. 그러나 많은 연구자들은 여과기간 동안 일어나는 빠른 침전에 대해 어려움을 겪었으며, 침전되는 속도에 의해 침전물이 여과 케이크 위에 쌓이며, 이 쌓인 침전물이 그 순간부터 케이크로서 행동한다고 보았다.^{1,2)} 이 경우 본래의 고체 분율인 현탁액의 고체 분율, S 는 쉽게 측정되어 질 수 없다. 투명 여과 셀(filtration cell)에서 케이크 두께의 육안 측정으로도 정확한 케이크의 고체 분율, S_c 가 얻어 질 수 없다. 잘못된 현탁액의 고체 분율, S 와 케이크 내 고체 분율, S_c 가 틀린 평균 비저항값을 줄 수 있다. 이에 Yim³⁾은 침전물과 케이크의 정의를 명확히 하였으며, 여과실험에 미치는 영향을 고려한 정확

한 평균 비저항값 측정에 대한 논문도 발표하였다.⁴⁾

본 연구는 Yim과 Ben Aim⁵⁾의 ‘여과-투과(filtration-permeation) 실험방법’으로 여과 시작 전에 일정시간 침전을 수행한 후 케이크 여과를 입자현탁액과 플러현탁액에 대해 수행하였다. 또한 투과시간을 연장시킨 실험을 통하여 케이크나 여과매체에서 미세한 입자의 이동이 연구되어 질 수 있음을 보였다. 만일 미세한 입자가 여과실험을 수행하는 동안에 여과 케이크나 여과매체를 이동한다면, 매우 얇은 케이크에 대한 투과기간에서도 미세한 입자의 이동을 기대할 수 있다. 이러한 현상의 결과로서 케이크를 통과한 투과속도는 투과기간 동안에 변화해야만 한다.

여과에 의해 결정되는 압축성(compressibility)은 여러 압력에서 여러 번의 여과실험을 통해 얻어진다. 본 연구에서는 여과-투과 실험으로 투과과정에서 단계적으로 압력을 증가시킴으로써 단 한번의 실험에 의해 압축성을 계산하는 방법을 제안하였다. 또한 적은 양의 슬러리로 여과-투과 실험을 수행하는 경우 여과기간은 평균 비저항값을 계

[†] Corresponding author

E-mail: yimsungsam@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7504

Fax: 032-860-7504

산하기 위한 충분한 실험 데이터를 줄 수 없지만, 투과기간에서의 투과속도는 쉽게 측정되어 질 수 있음을 보였다. 마지막으로 여과가 잘 되지 않는 케이크에 대해 Büchner funnel 실험으로 케이크 평균 비저항값을 측정하는 것은 시간이 많이 걸리고 숙련된 실험자만이 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 여과-투과 실험을 수행하면, 특히 높은 평균 비저항값을 갖는 케이크에 대해 비교적 짧은 시간 내에 평균 비저항값을 측정할 수 있음을 보였다.

2. 문헌연구

2.1. 여과이론

금세기 초부터 현재까지 여과현상을 표현하기 위하여 Darcy⁶⁾의 식에서 유도된 식에 케이크에서의 압력과 여과매체에서의 압력을 고려한 여과전체 압력이 적용된 다음 식 (1)로 나타내어진다.

$$v_o = \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_w W + R_m)} \quad (1)$$

여기서, V는 여과 단위 면적당 여액의 부피(m³/m²), t는 여과시간(sec), Δp는 여과압력(Pa), μ는 여액의 점도(kg·m/s), α_w는 여과 평균 비저항(m/kg), W는 여과 단위 면적당 케이크의 질량(kg/m²), R_m은 여과매체의 저항(m⁻¹)이다.

여과가 시작되는 순간에는 여과매체 위에 케이크가 형성되지 않았으므로 식 (1)에서 단위 면적당 케이크의 질량 W는 존재하지 않게 된다. 이 순간 이후 즉, 여과조작이 진행되는 기간에는 여과 단위 면적당 케이크의 질량 W값이 증가함으로 이에 대한 물질수지를 단위 면적당 케이크의 질량으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{현탁액 전체의 질량} &= \text{케이크의 질량} + \text{여액의 질량} \\ \frac{W}{S} &= \frac{W}{S_c} + \rho V \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, ρ는 여액의 밀도(kg/m³), S는 여과 대상 현탁액 내의 고체 분율, S_c는 여과 케이크 내의 고체 분율이다.

식 (2)로부터, W = CV라 정의하면 여액 부피당 형성되는 여과 케이크의 질량, C는 다음과 같이 표현된다.

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

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리하면,

$$\frac{dt}{dV} = \frac{dV}{dV} = \frac{\mu \alpha_w C}{\Delta p} V + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \quad (4)$$

이며, 식 (4)를 적분하여 다시 정리하면 아래와 같이 된다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \alpha_w C}{2 \Delta p} V + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \quad (5)$$

위의 식 (5)는 통상 parabolic equation이라 불리우며, 1916년 Sperry가 처음으로 제안⁷⁾하였다.

Tiller와 Cooper⁸⁾는 이들 식이 내포하는 문제점을 분석하였으며, 침전을 막기 위해 Tiller와 Leu⁹⁾는 여과동안 현탁액을 교반했으며, 이 교반은 교차여과와 비교하여 케이크의 형성에 영향을 준다. 여과동안 평균 비저항값 α_w는 식 (3)과 (4)를 사용하여 계산한다.

2.2. 여과-투과(filtration-permeation) 이론

‘여과-투과(filtration-permeation)’ 실험방법은 여과 케이크의 특성을 연구하기 위하여 Yim과 Ben Aim⁵⁾이 개발한 새로운 실험방법이다. 이 방법은 보통의 여과를 수행하여 여과 케이크를 형성시키고, 형성된 케이크에 입자 제거수 (particle removed water)를 통과시켜 투과속도를 측정하는 방법이다. 투과조작은 여과가 끝난 후에 수행하므로 상당한 양의 케이크가 형성되어 투과기간에는 α_wW 값이 R_m에 비해 대단히 커진다. 식 (1)에서 R_m값을 무시하여 정리하면, 다음과 같은 식 (6)을 얻을 수 있다.

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

이론적인 여과-투과 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 여과가 진행되는 기간은 앞부분의 기울기를 가진 직선 부분으로 직선의 기울기는 식 (4)에 의해 μ α_w C / Δp 로 나타낸다. 이는 여과실험을 통하여 여과시간에 따른 여액의 부피를 정밀하게 측정하여 각 구간의 Δt/ΔV를 계산하고, 각 구간의 평균 V 값을 계산하여 그린 그래프이다. 이 결과 얻은 기울기 b와 점도 μ, C 그리고 여과 압력값을 사용하여 여과 평균 비저항값 α_w를 구할 수 있다. 이 여과 평균 비저항 측정 방법은 거의 80년에 걸쳐 변함없이 사용되고 있다. 그러나 Yim³⁾은 여과 도중 여과 대상액에 침전이 일어나는 경우 이 방법을 사용할 수 없다는 것을 밝혔다. 식 (4)의 마지막 항이 Fig. 1의 실험 결과를 외연장하여 y축과 만나는 절편값이 된다. 즉 절편값은 μ R_m / Δp 여서 여액의 점도와 여과 압력값을 사용하여 R_m을 구할 수 있다. 이 방법 또한 80년 이상 사용되고 있으나 Yim 등⁴⁾은 이 방법에 대한 문제점을 제시하는 논문을 발표하였다.

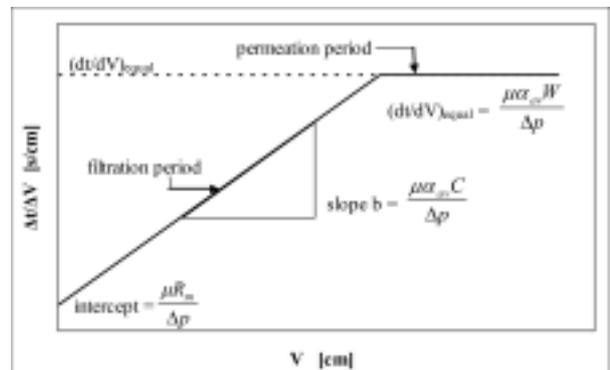


Fig. 1. Theoretical result of a filtration-permeation experiment.

Fig. 1의 뒷부분은 이미 형성된 케이크에 입자 제거수를 통과하는 시간이므로 물의 투과속도($\Delta t/\Delta V$)는 이론적으로는 항상 일정해야 한다. 이 일정한 값과 여과 후 측정된 여과 단위 면적당 케이크의 질량(W), 투과 압력(Δp), 액체의 점도(μ)를 식 (6)에 대입하여 투과기간의 평균 비저항 값 $\alpha_{av,p}$ 을 쉽게 계산할 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

Fig. 2는 여과 셀(filtration cell)을 밀봉하여 가압할 수 있게 제작한 여과-투과 실험장치이다. 여과 셀과 가압을 위한 질소가스 탱크 사이에 설치된 400 mL의 빈 용기는 입자 제거수로 채워져 있고, 이는 투과 실험을 가능하게 하는 새로운 개념이다. 압력은 입자 제거수가 들어있는 용기에 공급되며, 여과는 현탁액이 채워진 가압된 여과 셀 아래 위치한 밸브를 열어 시작한다. 여과가 진행되면서 나간 여액만큼의 입자 제거수가 여과 셀에 공급이 되어 자연스럽게 여과-투과가 연이어 진행된다. 이 장치는 주로 응집물의 여과에서 사용하였다.

감압식 여과-투과 실험장치는 Fig. 3에 나타내었다. 이 장치는 통상적인 Büchner funnel에 다음의 두 부분을 변형시켜서 사용하였다. 대부분의 여과 셀은 동일 높이에서 많은 양의 현탁액을 담기 위해 여과매체의 약간 윗부분이 여과 면적보다 넓게 되어 있다. 그러나 이 넓어지는 부분에 침전된 입자가 쌓이므로 이를 방지하기 위해 본 연구에서는 여과매체와 동일한 원기둥형의 여과 셀(D:4 cm, H:16 cm)을 제작하여 사용하였다. 40 L 공기탱크가 아스피레이터(aspirator)에 의한 압력의 요동을 방지하기 위해 여과기와 아스피레이터 사이에 설치되었다. 여과를 시작하기 전 여과기와 공기탱크 사이의 밸브를 잠그고 아스피레이터를 가

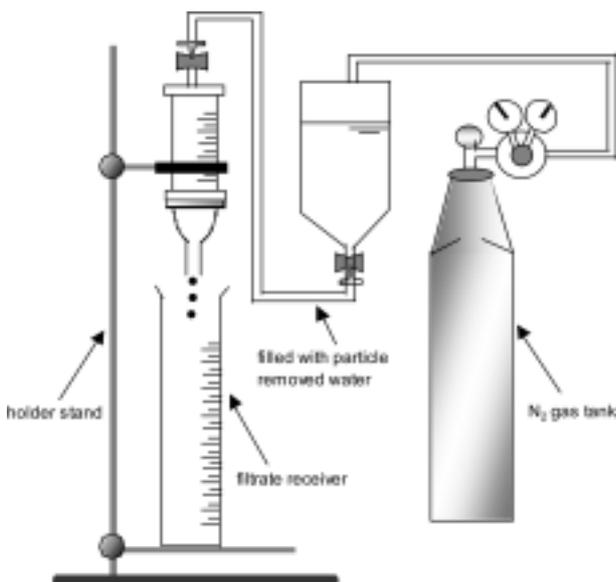


Fig. 2. Schematic diagram of pressure filtration apparatus.

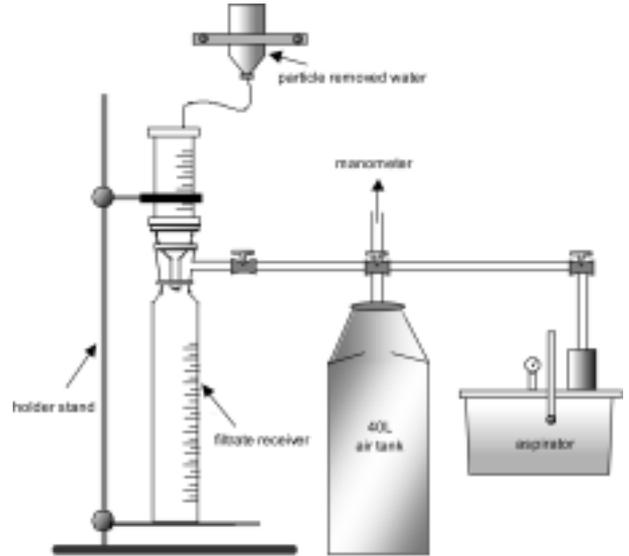


Fig. 3. Schematic diagram of a vacuum filtration apparatus.

동시켜 공기탱크의 절대압력을 0.5 기압보다 조금 더 낮게 한다. 그 후 아스피레이터와 공기탱크 사이의 밸브를 잠그고 아스피레이터를 정지시킨다. 현탁액을 여과 셀에 넣고 동시에 여과기와 공기탱크 사이의 밸브를 열어 여과를 시작한다. 통상적으로 200 mL의 여과와 200 mL의 투과를 수행하였으므로 실험이 끝나면 400 mL의 부피가 증가한 셈이 되므로, 압력차는 초기 압력차의 약 1%가 된다. 투과를 위한 입자 제거수는 여과 셀의 윗 부분에서 여과가 80% 정도 진행된 후부터 케이크를 다치지 않도록 조심스럽게 첨가하였다.

3.2. 실험 대상 물질

본 실험에 사용된 입자 제거수는 RO(reverse osmosis)막을 거친 초순수를 다시 cellulose nitrate 재질인 0.45 μm 와 0.2 μm 의 MF막 2장을 겹쳐 감압여과시킨 물을 사용하였으며 기포를 제거하여 사용하였다. 또한 입자 제거수를 현탁액 제조 시 용매로 사용하였다.

입자현탁액으로는 대표적으로 많이 사용하는 탄산칼슘(CaCO_3)현탁액을 사용하였으며, 플러현탁액 또한 많이 사용되는 벤토나이트 현탁액을 분자량 10^5 인 양이온 고분자 응집제(Cyanamid Superfolc(Superfloc) C 581)로 응집시켜 사용하였다. 여과매체는 Advantec 東洋濾紙株式會社(일본)에서 제조된 Advantec Toyo 5C를 입자현탁액 여과에 사용하였으며, 플러현탁액 여과에서는 프랑스의 Sartorius사에서 제조한 공극 직경 8 μm 여과막을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 여과시작 전 침전의 영향에 의한 평균 비저항값 측정

4.1.1. 입자현탁액

일반적인 여과조작에서는 여과와 더불어 침전이 수반된

다. 즉, 여과 대상 현탁액을 여과 셀에 주입하게 되면 처음에는 현탁액의 농도가 전체적으로 균일하지만 여과가 시작되면서 입자들의 침전이 시작되어 상등액과 처음 주입된 현탁액의 농도보다 진해진 현탁액, 즉 침전층으로 분리가 일어나게 된다. 이러한 침전의 영향으로 인하여 여과 평균 비저항값의 변화를 보다 정확히 알아보기 위하여 1 wt% CaCO₃ 현탁액을 0.5 기압의 여과압력에서 여과-투과 실험을 선침전시간(pre-sedimentation time)별로 수행하였다. 즉, 여과실험을 수행하기 전에 0, 3, 6, 10, 15, 30분으로 각각 정지하여 침전시킨 후 여과-투과 실험을 실시하였다. 이 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보면, 사전 침전시간이 길어짐에 따라 여과 기간의 직선의 기울기가 수평으로 변하여 투과기간의 직선 유형으로 근접함을 볼 수 있다. 이는 여과기간의 비저항값은 감소하고 여과매체의 저항값은 반대로 증가함을 나타낸다. 이러한 사실을 Table 1에 보다 자세히 나타내었다.

Table 1에서 보듯이 동일한 농도에서 선침전시간의 변화만으로 여과 평균 비저항, $\alpha_{av,f}$ 값과 여과매체 저항, R_m 값이 매우 다를 수 있다. 즉, 선침전시간이 없을 경우(0분) 여과 평균 비저항, $\alpha_{av,f}$ 값은 7.57×10^{10} m/kg이며, 선침전시간이 30분일 경우 $\alpha_{av,f}$ 값은 1.36×10^{10} m/kg으로 최고 5.6배의 차이를 보이며 선침전시간이 길수록 줄어들었다. 또한 여과매체의 저항, R_m 값은 선침전시간이 없을 경우(0분) 1.92×10^{10} m⁻¹이며, 선침전시간이 30분일 경우 R_m

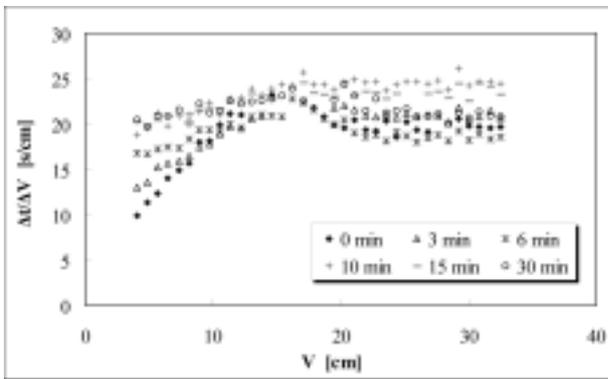


Fig. 4. Filtration-permeation result of 1 wt% CaCO₃ suspension for the change of pre-sedimentation time.

Table 1. The values of $\alpha_{av,f}$, $\alpha_{av,p}$ and R_m as varying pre-sedimentation time for the filtration-permeation of 1 wt% CaCO₃ suspension

sedimentation time [min]	$\alpha_{av,f}$ [m/kg]	$\alpha_{av,p}$ [m/kg]	R_m [m ⁻¹]
0	7.57×10^{10}	6.19×10^{10}	1.92×10^{10}
3	4.00×10^{10}	6.48×10^{10}	5.07×10^{10}
6	2.26×10^{10}	5.91×10^{10}	7.31×10^{10}
10	2.34×10^{10}	7.53×10^{10}	8.65×10^{10}
15	1.68×10^{10}	7.23×10^{10}	9.26×10^{10}
30	1.36×10^{10}	6.65×10^{10}	9.49×10^{10}

값은 9.49×10^{10} m⁻¹으로 여과 평균 비저항값이 줄어든 만큼 여과매체의 저항값이 5배 정도 차이를 가지며 증가하였다. 반면에 투과 평균 비저항, $\alpha_{av,p}$ 값은 선침전시간이 없을 경우(0분) 1.92×10^{10} m/kg이며, 선침전시간이 30분일 경우 9.49×10^{10} m/kg으로 약 1.2배의 차이로 거의 일정함을 보이고 있다. 이렇게 여과 평균 비저항값이 선침전시간에 따라 변화하는 이유는 전통적인 여과 방법인 식 (4)를 사용하여 여과 평균 비저항값과 여과매체 저항값을 측정하였기 때문이다. 이 전통적인 방법은 초기의 정확한 실험 결과를 알 수 없고, 침전에 대한 고려가 없기 때문에 위와 같은 오류를 범할 수 있다. 이러한 오류를 줄이기 위해서 Yim에 의해 개발된 새로운 여과-투과 실험방법^{5,10)}으로 여과기간만이 아닌 투과기간의 평균 비저항값도 측정하였다.

Yim은 이전에 여과실험을 수행하는 데 있어서의 침전이 미치는 영향에 대한 분석³⁾과 여과 초기현상에 대한 분석¹¹⁾을 제시한 바가 있으므로 여기에서는 자세한 내용을 생략하기로 한다.

4.1.2. 플럭현탁액

4.1.1절의 입자현탁액과 동일한 방법으로 선침전시간(pre-sedimentation time)에 따른 영향을 플럭현탁액에 적용해보았다. 실험은 벤토나이트 현탁액을 양이온 고분자 응집제로 응집시킨 플럭을 1기압의 여과압력에서 선침전시간 0, 5, 10분을 각각 침전시킨 후 여과실험을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 검은색 동그라미는 선침전시간이 없을 경우, 흰 세모는 선침전시간을 5분간 수행한 후 여과실험을 진행한 경우, 그리고 별표는 10분간의 선침전시간을 수행한 후 여과실험을 수행한 값이다. 세 그래프 모두 3가지 단계를 보이고 있다. 즉, 여과지 단위 면적당 여액의 부피, V가 약 8 cm까지는 직선의 기울기를 가지는 여과기간과 V가 13.5 cm까지는 플럭 형성으로 인한 빠른 침전 및 선침전으로 인해 윗 부분에 남아있는 상등액이 형성된 케이크를 통과하는 투과기간으로 이어진다. 그 후 여과가 종료되는 시점인 V가 15 cm까지는 케이크에 남아 있는 물이 모두 빠지는 압착과정으로 진행된다.

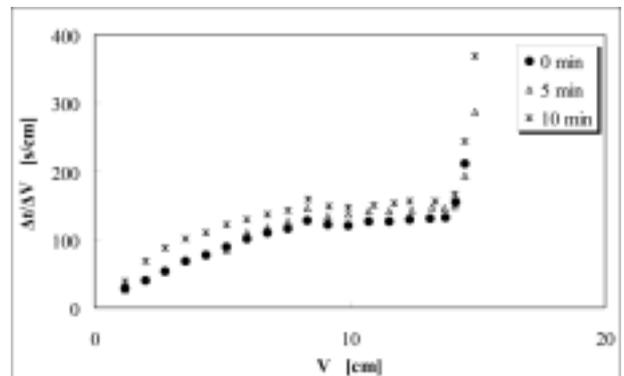


Fig. 5. Filtration result of bentonite floc for the change of pre-sedimentation time.

앞선 Fig. 4의 입자현탁액의 선침전시간에 따른 여과실험 결과와는 다르게 Fig. 5의 플럭현탁액의 여과실험 결과는 선침전이 없는 경우나 선침전시간을 수행한 경우 모두 동일한 그래프 형태를 나타낸다. 이는 응집제를 이용하여 응집시킨 플럭이 일반 입자보다 크고 무겁기 때문에 선침전을 수행하지 않아도 빠른 시간에 침전이 일어나기 때문에 비슷한 형태를 띄고 있게 된다. 그러나 초기 선침전을 수행한 후 여과를 시작하면 여과 속도가 느려져 비저항값은 커지게 된다.

선침전시간 변화에 따른 여과실험 결과로 여과 평균 비저항값을 계산하기 위해선 식 (3)을 사용하여 C값의 계산이 먼저 이루어져야 한다. 이때 C값의 항목 중 케이크의 고체 분율 S_c 값을 생략하고 계산할 경우 상당한 정도의 오차가 발생하게 된다. 일반적으로 이 입자현탁액 여과에서는 S/S_c 값이 0.01 이하이므로 그 값을 생략해도 C값에는 별 영향을 주지 못한다. 그러나 플럭의 여과에서는 S/S_c 값이 0.2 이상이 되므로 그 값을 생략할 경우 C값에 큰 오차를 주어 여과 평균 비저항값에도 커다란 오차가 생긴다. 이러한 경우를 예방하기 위하여 본 연구에서는 Yim에 의해 제시된 고액분리 통합이론¹²⁾을 이용하여 정확한 S_c 값으로 여과 평균 비저항값을 계산하였다. 이러한 계산 결과 얻어진 여과, 투과 평균 비저항값 및 여과매체의 저항값을 Table 2에 나타내었다. 여과 평균 비저항값은 침전이 없는 경우 1.51×10^{12} m/kg이었으며, 10분간 침전시에는 3.12×10^{12} m/kg으로 약 2배 정도의 차이를 나타내었다. 반면에 투과 평균 비저항값은 4.77×10^{11} m/kg으로 일정함을 볼 수 있다.

4.2. 이미 형성된 케이크에 대한 장시간의 투과실험과 응집되지 않은 응집제의 이동

4.2.1. 입자현탁액

여과-투과 실험의 이해를 돕기 위해 투과시간을 늘려서 실험을 진행하였다. 실험은 1 wt% CaCO₃ 현탁액을 0.5 기압에서 여과실험을 수행한 후 장시간의 투과 실험한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

투과기간의 $\Delta t/\Delta V$ 값은 많이 변화하지 않지만 천천히 증가한다. 데이터의 요동은 측정시간을 측정하는데 1~2초의 오류로 나타났다. 대체로 이 결과는 식 (6)과 여과-투과 타당성을 나타내었다. $\Delta t/\Delta V$ 의 약간의 증가는 미세한 입자의 이동에 의해 케이크 내 고형물의 재배열로 기인되지만 이들의 영향은 크지 않다.

Table 2. The values of $\alpha_{av,f}$, $\alpha_{av,p}$ and R_m as varying pre-sedimentation time for the filtration of bentonite floc

Pre-sedimentation time [min]	$\alpha_{av,f}$ [m/kg]	$\alpha_{av,p}$ [m/kg]	R_m [m ⁻¹]
0	1.51×10^{12}	4.77×10^{11}	1.17×10^{11}
5	2.03×10^{12}	4.77×10^{11}	1.83×10^{11}
10	3.12×10^{12}	4.77×10^{11}	3.71×10^{10}

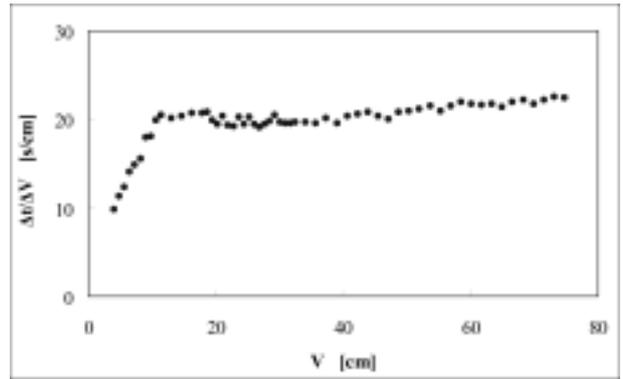


Fig. 6. Extension of permeation time for 1 wt% CaCO₃ suspension.

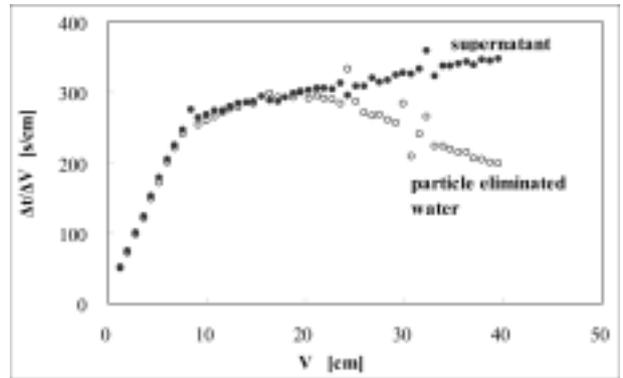


Fig. 7. Extension of permeation time for bentonite floc.

4.2.2. 플럭 현탁액

벤토나이트 현탁액을 양이온 고분자 응집제로 응집시킨 플럭현탁액을 1 기압에서 여과실험을 수행한 후 투과시간을 연장시켜 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7의 결과는 2개의 그래프에 대해서 나타내었다. 첫째는 앞의 Fig. 5에서와 같이 플럭여과에서는 크기가 크고 무거운 플럭 입자에 의해 빠른 침전으로 상등액의 투과가 일어난다. 상등액 투과에 대한 $\Delta t/\Delta V$ 의 값은 한결같이 증가한다. 이는 케이크의 평균 비저항값은 현탁액 내 응결하지 않은 입자의 존재, 침전하지 않은 적은 플럭, 결합하지 않은 응집제에 의해 증가한다고 본다. 둘째는 형성된 케이크를 통한 입자 제거수의 장기간 투과에 따른 그래프이다. 이 경우 $\Delta t/\Delta V$ 는 최대에 도달하고 최대에서 비교적 오랜 기간 후 천천히 감소한다. 여기서 $\Delta t/\Delta V$ 의 변화는 이전과 반대되는 현상으로 평균 비저항값의 감소이다. 이에 대한 분석은 2가지 방법으로 예측할 수 있다. 하나는 적은 입자들이 케이크와 여과매체의 잔존하는 영역을 통과하며, 다른 가능성은 케이크나 여과매체를 통해 입자를 형성하는 케이크에 약하게 부착되는 혹은 케이크 구조 사이에 자유롭게 존재하는 개개 응집제의 움직임인데, 즉 응집제의 씻김이다. 이 플럭에 대해 자유롭게 존재하거나 약하게 부착된 응집제는 다음과 같은 실험으로 확인되었다. 침전된 플럭의 상등액을 신중히 따라내고 입자 제거수를 처음 부피의 5배에 다다를 때까지 침전된 플럭에 조심스

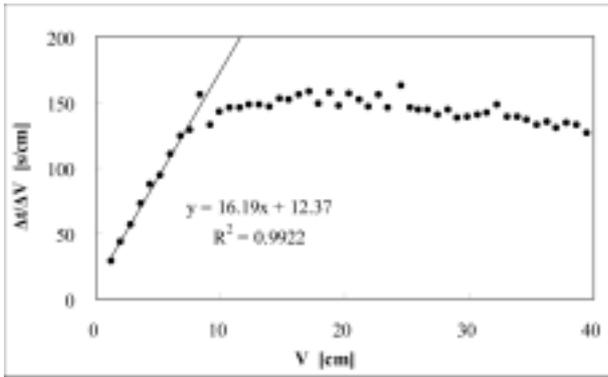


Fig. 8. Filtration with washed bentonite floc.

럽게 투입한다. 이 혼합물이 다시 침전되고 상등액은 제거된다. 조작에 의해 플럭 파괴에도 불구하고 여과-투과 동안 이 플럭의 평균 비저항값은 세척되지 않은 플럭의 1/2이다. 실험결과는 Fig. 8에 나타내었다. 세척에 의해 미세한 입자와 적은 플럭이 자유롭게 혹은 약하게 부착된 응집체와 함께 씻겨 나간다.

고분자 응집제의 씻김 현상에 대해서는 이미 Yim 등¹³⁾에 의해 설명되어진 바 있다.

4.3. 한번의 여과-투과로 인한 케이크의 압축성 측정

여과 압력의 증가에 따라 평균 비저항값 α_{av} 는 다음 식 (7)에 의해 계산될 수 있다.

$$\alpha_{av} = a' \Delta p^{n'} \quad (7)$$

식 (7)에서 n' 는 압축성(compressibility)이라 한다. 이 식 (7)은 실험한 압력 이외의 여러 압력에서 α_{av} 값을 산출하는데 사용되었다. 지금까지는 압력을 변화시키면서 각 압력에서의 α_{av} 값으로 n' 를 결정하였다. 본 연구에서 사용되는 여과-투과(filtration-permeation) 방법을 사용하면 비교적 낮은 압력에서 충분한 현탁액으로 여과조작을 마치고 투과 조작까지 어느 정도 수행한 후 Δp 를 단계적으로 증가시키면서 각 단계에서의 일정한 $\Delta t/\Delta V$ 값으로 투과 평균 비저항, $\alpha_{av,p}$ 값을 구할 수 있다.

1 wt% CaCO₃ 현탁액을 0.5 기압으로 여과실험을 수행하고 연이어 투과실험을 수행하면서 Δp 를 단계적으로 증가시켰다. 각 단계에서의 일정한 $\Delta t/\Delta V$ 값으로 계산된 투과 평균 비저항, $\alpha_{av,p}$ 값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Average specific resistance with step increase of pressure in permeation period

Δp [Pa]	$\alpha_{av,p}$ [m/kg]
1.01×10^4	6.25×10^{10}
3.04×10^4	1.05×10^{11}
5.07×10^4	1.13×10^{11}
7.10×10^4	1.32×10^{11}

Table 3의 결과는 $\Delta t/\Delta V$ 값이 연장되는 투과 동안에 변화되는 부분의 압력과 그에 따른 투과 평균 비저항값이다. 이 결과를 식 (7)에 대입하여 계산한 압축성 n' 값은 0.3751이었다. Tiller와 Leu⁹⁾의 정의에 의해 본 연구에서 사용된 입자 현탁액인 탄산칼슘(CaCO₃)는 비압축성케이크(incompressible cake)이다. 이렇듯 본 연구에서 제안한 “여과-투과 실험방법”을 사용하면 단 한번의 실험으로 압축성 n' 값을 계산할 수 있는 장점이 있다.

4.4. 여과-투과에 의한 평균 비저항의 빠른 측정

매우 미세한 입자로 구성된 케이크(즉, 잘 여과되지 않는 케이크)의 평균 비저항값은 묽은 현탁액을 사용하여 비교적 짧은 시간에 측정될 수 있으나 침전된 플럭의 농도는 쉽게 변화하지 않는다. 폐수처리에 사용되는 활성슬러지의 평균 비저항값은 10¹⁴ m/kg이다. 이 큰 값을 측정하기 위하여 Büchner funnel 실험에 필요한 시간은 매우 길다. 적은 양의 활성슬러지로 여과-투과 실험을 수행하는 경우 여과 데이터로 여과 평균 비저항값을 얻기에는 불충분하지만, 투과기간에서 얻어진 $\Delta t/\Delta V$ 값에 의해 투과 평균 비저항값을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 활성슬러지의 양을 100, 50, 25 cm³로 줄여가면서 여과-투과 실험을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

Fig. 9에서 빗금친 부분은 여과 평균 비저항, $\alpha_{av,f}$ 값을 나타낸 것이고, 검은색 막대그래프는 투과 평균 비저항, $\alpha_{av,p}$ 값을 나타낸 것이다. $\alpha_{av,p}$ 값이 $\alpha_{av,f}$ 보다 조금 높게 나타났으나 활성슬러지의 양의 변화에 그리 영향을 받지 않아 소량의 양을 사용하여 여과-투과 실험방법으로 평균 비저항값을 보여준다. 활성슬러지 혹은 침전된 플럭의 부피 감소에 의해 여과시간은 큰 정도로 짧아지고 투과는 빠르게 일어난다. 이 방법은 5.2×10¹³ m/kg의 평균 비저항값을 갖는 활성슬러지의 부피일 때 Büchner funnel 실험보다 5배 빠르고, 보통의 Büchner funnel 실험의 1/10로 감소된다. 활성슬러지와 같이 높은 평균 비저항값의 물질은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 시료부피의 감소가 평균 비저항값에 영향을 미치지 않는다. 왜냐하면 높은 평균 비저항값을 갖는

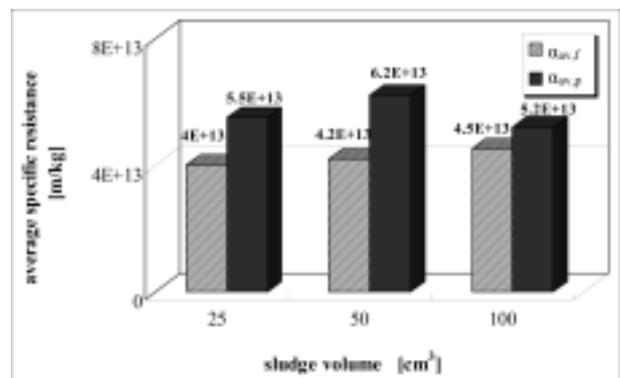


Fig. 9. Average specific resistances on reducing floc volume.

케이크는 치밀한 구조이고, 투과속도는 비교적 얇은 케이크조차도 매우 느리기 때문이다.

5. 결론

여과이론을 분석하는데 여과-투과라는 새로운 실험방법이 제안되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 여과실험에 영향을 미치는 인자 중 하나인 침전에 대한 영향을 알아보기 위하여 여과 시작전에 침전시간을 달리하여 여과실험을 입자현탁액과 플럭현탁액에 대해서 각각 수행하였다. 그 결과 침전의 영향으로 정확한 평균 비저항값을 얻을 수 없었다. 그러나 본 연구에서 제안한 여과-투과 실험방법으로 얻어진 투과기간의 평균 비저항값은 침전의 영향이 없으므로 비교적 정확한 평균 비저항값이 측정된다.

2) 투과기간을 연장시켜 여과-투과 실험을 입자현탁액과 플럭현탁액에 대해서 각각 수행하였다. 그 결과 입자현탁액에서는 투과기간의 증가에 따라 별 영향이 없음을 보였으나, 플럭현탁액에서는 2가지 현상을 예측할 수 있었다. 하나는 응결되지 않은 응집체의 막힘현상이고 또 다른 하나는 응집체의 씻김현상이다.

3) 한번의 여과-투과 실험을 통해서 압축성(n)을 예측할 수 있었다.

4) 평균 비저항값이 큰 활성슬러지 혹은 화학적 플럭의 여과시간을 단축시키는 방법으로 여과-투과 실험방법을 제안하였다.

사 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Bockstal, F., Fouarge, L., Hermia, J., and Rahier, G., "Constant Pressure Cake Filtration with Simultaneous Sedimentation," *Filtration & Separation*, **22**, 255~257 (1985).
- Tiller, F. M., Hsyung, N. B., Shen, Y. L., and Chen, W., "Catscan Analysis of Sedimentation and Constant Pressure Filtration," *5th World Filtration Congress*, World Filtration Congress, Nice, pp. 80~85(1990).
- Yim, S. S., "A Theoretical and Experimental Study on Cake Filtration with Sedimentation," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(3), 308~315(1999).
- 임성삼, 송연민, 전세진, "여과 평균 비저항값의 측정에 대한 고찰: 입자 현탁액과 응집물의 케이크 여과," *한국화학공학회지*, **40**(3), 330~339(2002).
- Yim, S. S. and Ben Aim, R., "Highly Compressible Cake Filtration : Application to the Filtration of Flocculated Particles," *4th World Filtration Congress*, World Filtration Congress, Ostend(Belgium), pp. A1~A7(1986).
- D'Arcy, H. P. G., *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*, Victor Delmont, Paris, APPENDICE - NOTE D(1856).
- Sperry, D. R., "The Principles of Filtration," *Metallurgical and Chemical Engineering*, **14**(4), 198~203(1916).
- Tiller, F. M. and Cooper, H. R., "The Role of Porosity in Filtration IV : Constant Pressure Filtration," *AIChE J.*, **6**(4), 595~601(1960).
- Leu, W. and Tiller, F. M., "Experimental Study of the Mechanism of Constant Pressure Cake Filtration : Clogging of Filter Media," *Sep. Sci. Technol.*, **18**(12&13), 1351~1369(1983).
- Yim, S. S., "A New Method : Filtration-Permeation for Filtration Theory and Application," *5th World Filtration Congress*, World Filtration Congress, Nice, pp. 91~97 (1990).
- Yim, S. S. and Kim, J. H., "An Experimental and Theoretical Study on the Initial Period of Cake Filtration," *Korean J. Chem. Eng.*, **17**(4), 393~400(2000).
- Yim, S. S. and Kwon, Y. D., "A Unified Theory on Solid-Liquid Separation: Filtration, Expression, Sedimentation, Filtration by Centrifugal Force, and Cross Flow Filtration," *Korean J. Chem. Eng.*, **14**(5), 354~358(1997).
- 임성삼, 송연민, 김도형, "고분자 용액의 여과특성," *한국화학공학회지*, **42**(3), 304~310(2004).