

여과 평균 비저항값의 측정에 대한 고찰: 입자 현탁액과 응집물의 케이크 여과

임성삼[†] · 송연민 · 전세진*

인하대학교 환경공학과

*대원과학대학 환경생명과학

(2001년 11월 26일 접수, 2002년 3월 27일 채택)

Study on the Measurement of Average Specific Cake Resistance in Cake Filtration of Particulate Suspension and Sedimented Floc

Sung Sam Yim[†], Yun Min Song and Se Jin Jun*

Department of Environmental Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

*Department of Environment and Life Science, Daewon Science College, Jechon 390-702, Korea

(Received 26 November 2001; accepted 27 March 2002)

요 약

케이크 여과에서 평균 비저항값의 정확한 측정은 산업 현장이나 연구면에서 기본적인면서 대단히 중요한 사항이나 이에 대한 자세한 연구가 이루어지지 않고 있었다. 본 연구에서는 실험과 이론적인 분석을 통하여 현탁액중의 입자와 여과매체 세공의 상대적인 크기, 현탁액의 초기 농도, 여과 진행중의 침전 속도, 여과 시작 전의 사전 침전이 여과 평균 비저항에 미치는 영향의 정도를 연구하였으며, 이런 영향들을 배제하고 정확한 평균 비저항값을 연구하는 방법을 제안하였다. 또한 침전시킨 플러의 여과에서 케이크의 고형분 함량을 결정하는 방법을 제안하였으며, 이 방법을 사용하지 않는 경우 평균 비저항값이 정확한 값의 52%로 측정되는 경우도 있음을 입증하였다.

Abstract – The exact measurement of average specific resistance in a cake filtration is fundamental and important for the industrial operation and research. In spite of the importance, the influences of the relative size between the particles in suspension and pores of filter medium, the initial concentration of suspension, the velocity of sedimentation during filtration, the pre-sedimentation time before the start of filtration to the measured values of average specific cake resistance were not been studied. These phenomena have been studied experimentally and analyzed, then the methods to eliminate such effects to measure the accurate specific cake resistance are proposed. A method of measuring the exact solid content of a cake for the floc filtration is also proposed. Without this method the average specific cake resistance would be measured only 52% of the exact value.

Key words: Filtration, Cake Filtration, Filtration-Permeation, Floc Filtration, Sedimentation During Cake Filtration

1. 서 론

케이크 여과 장치의 설계와 케이크 여과 이론의 전개에 여과 평균 비저항값(average specific cake resistance)은 가장 큰 역할을 한다. 각 종류의 입자가 현탁된 현탁액의 여과 평균 비저항값의 측정방법과 압력에 따른 여과 평균 비저항값의 변화를 측정하는 많은 논문이 이를 보여준다.

Ruth[1]에 의하면 처음에는 부피를 기준으로 한 여과 평균 비저항값도 사용되었으나 1930년 경 케이크의 고체 질량을 기준으로 한 값이 사용되기 시작하였다고 한다. 고체 질량을 기준으로 한 여과 평균 비저항값은 그 이후 전 세계적으로 이의 없이 거의 60년 동안 사용되었다. Tiller와 Kwon[2]이 다시 부피를 기준으로 한 여과 평균 비저항값을 사용하기 시작하였으나 본 연구에서는 질량을 기준으로 한 값을 사용하였다.

이처럼 오래 사용되어온 여과 평균 비저항은 본 연구자를 제외한 모든 사람들이 여과를 수행하면서 측정 한 여액의 부피와 시간과의 관계에서 산출하고 있다. 본 연구에서는 여과 평균 비저항값을 측정하는 과정에서 야기될 수 있는 여러 문제점을 분석하고, 그 문제점들을 제거하고 정확한 여과 평균 비저항값을 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 여과 도중에 발생하여 여과 평균 비저항값의 측정에 오류를 줄 수 있는 현상들을 열거하면 아래와 같다.

본 연구를 시작하는 주제는 여과 실험 진행 도중 발생하는 침전의 영향이다. 여과에 대한 이론이 정립되기 전부터 Sperry[3]에 의해 여과 실험 중 일어나는 침전이 여과 성질을 측정하는 데 영향을 준다는 것이 밝혀졌다. 그는 이 현상을 줄이기 위해 여과대상 현탁액을 여과 실험 전에 일정 시간동안 미리 침전시키고, 그 기간에 침전이 안 된 현탁액을 여과 실험에 사용하였다. 그러나 실제 여과에서 이런 방법을 사용할 수는 없다.

또한 입자를 응집시키고 곧 여과를 수행한 경우에는 응집물(floc)이

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: yimsungsam@ihha.ac.kr

상당히 빠른 속도로 침전하므로 침전의 영향이 매우 크게 된다. 그러므로 이 경우에 대한 분석도 필요하다.

현재의 여과이론에서는 동일 물질의 경우 그 물질을 현탁시킨 농도와는 관계없이 동일한 압력에서는 항상 같은 여과 평균 비저항값이 측정된다고 알려져 있다. 그리고 저자도 이 이론이 옳다고 확신하나, 실제 실험에 의해 측정되는 여과 평균 비저항값은 농도에 따라 다르다.

가압식 여과 장치를 사용하여 평균 비저항값을 측정할 경우 여액과 시간의 그래프가 감압식 여과 장치의 경우와 다르게 측정되는 경우가 많다. 이에 대한 분석도 수행되었다.

케이크 여과 이론에 의하면 여과매체(filter medium)는 여과 평균 비저항에 영향을 미치지 않아야 한다. 여과매체의 성질은 여과매체의 저항에 포함되는 것으로 알려져 있다. 그러나 실제 실험에서는 특정 여과매체가 여과 평균 비저항을 높이는 것으로 측정되는 경우도 있다. 이런 경우를 분석하고 이 현상을 피하기 위한 기본적인 방법을 마련하려 한다.

입자를 응집시킨 응집물의 여과는 대부분 응집물을 침전시킨 후 침전물로 여과를 시작한다. 이 응집물의 여과에서는 입자 현탁액의 여과의 경우와는 달리 여과 기간에 형성되는 케이크를 시각적으로 확인할 수 없다. 또한 응집 침전물이 여과에 의해 모두 케이크로 변환 후 별다른 징후가 없이 연이어 압착 공정으로 진행된다. 그러므로 평균 비저항값을 측정하기 위해 알아야 하는 여과 케이크의 성질인 케이크의 고체 질량 분율을 알 수 없다. 이 결과 응집물의 여과에서는 정확한 평균 비저항값을 측정할 수 없었다. 본 연구에서는 저자의 '여과-투과' 방법[4]으로 케이크의 고체 질량 분율을 측정할 수 있었다.

여과 평균 비저항값의 측정에 이상과 같은 여러 문제점이 존재함에도 불구하고 이에 대한 연구는 저자의 몇몇 논문[4-6] 이외에는 Tiller 등[7]의 논문이 있을 뿐이다. 본 연구는 위의 모든 주제를 이론적으로 검토하고, 각각의 현상이 미치는 영향을 분석하며, 가능하면 이런 현상을 배제하고 정확한 여과 평균 비저항값을 측정하는 방법을 제시하려 노력하였다.

2. 이 론

2-1. 여과 평균 비저항의 정의와 의미

여과 평균 비저항값은 흔히 Darcy의 공식이라고 불리는 다음의 식에 근거한다.

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

여기서 V 는 여과 단위 면적당 여액의 부피(m^3/m^2)이고, t 는 여과 시간(s), q 는 여액의 공탑 속도(m/s), Δp_c 는 케이크 양쪽 면의 압력의 차이(Pa), μ 는 여액의 점도(kg/ms), α_{av} 는 여과 평균 비저항(m/kg), W 는 여과 단위 면적당 케이크의 고체 질량(kg/m^2)이다. 이 식은 Darcy[8]가 발표한 형식과 완전히 동일하지는 않으나 그의 개념이 모두 포함되어 있으므로 여과에서는 흔히 Darcy의 공식이라 부른다. 이 식의 정확한 형태를 마련한 공로를 어느 한 사람에게 돌릴 수는 없다.

이 식은 다음에 나오는 여러 형태의 공식보다 여과 평균 비저항의 의미를 가장 잘 표현해 준다. 즉 여액의 속도는 케이크 양면의 압력의 차이에 직선적으로 비례하고, 분모 항인 $\mu \alpha_{av} W$ 에 반비례한다. 분모항 전체는 흐름에 대한 저항이며 그 중 α_{av} 는 이 저항을 정의하는 기준이 되어 '여과 평균 비저항'이라고 부른다. 이 식을 다시 정리하여 여과 평균 비저항을 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta p_c}{\mu q W} \quad (2)$$

Carman[9]은 이 식을 그대로 해석하여 여과 평균 비저항을 다음과 같

이 표현하였다. "여과 평균 비저항은 여과 단위 면적당 단위 질량의 케이크를 통과하는 단위 점도를 가지는 유체의 단위 유속을 나타내기 위한 압력을 말한다." (Carman은 W 대신 케이크의 길이를 사용하였으므로 (2) 식에 맞추어 표현을 약간 수정하였음을 밝혀둔다.) 이 정의는 실제로 사용하기에 적당하지 않다. 우리는 단위 점도 즉 1 kg/ms 를 가지는 액체를 사용하는 경우가 드물며, 또한 단위 유속인 1 m/s 는 여과에서 사용되지 않는 큰 유속이기 때문이다.

공간울이 동일한 입자층을 유체가 통과할 때 사용하는 Kozeny-Carman의 공식을 여과에 적용시키면 다음의 여과 비저항(specific cake resistance)이 정의된다[9, 10].

$$\alpha = \frac{(1-\epsilon) S_v^2 k_1}{\epsilon^3 \rho_p} \quad (3)$$

여기서 ϵ 은 공간울(-)이고, S_v 는 입자 단위 부피당 입자의 표면적 즉 고체의 비표면적(m^{-1})이다. k_1 은 입자에 따른 상수로서 대체로 5 부근의 값을 가지며, ρ_p 는 고체 입자의 밀도이다. 저자는 이 식이 여과 비저항을 구성하는 요소를 잘 표현한다고 생각한다.

만일 여과 케이크가 압력의 변화에도 공간울이나 비표면적이 변화하지 않을 경우에는 이 식으로 여과 기간의 비저항값을 계산할 수 있다. 이 경우에 한하여 위의 여과 비저항값은 여과 평균 비저항이 된다.

케이크 여과 과정에서 현탁액과 접하고 있는 케이크 층은 이 입자층이 유체의 흐름에 의해 받는 아주 낮은 항력(drag force)만을 받고 있으나, 내부로 갈수록 윗쪽 층의 항력이 전해져서 여과매체와 접하는 케이크 층은 전체 항력을 모두 받게 된다. 압축성 케이크에서는 항력의 차이에 따라 공간울이 달라지며, 응집물의 경우에는 이 항력으로 크기가 변화하여 고체의 비표면적도 케이크의 위치에 따라 변화한다. 그러므로 (3) 식을 압축성 여과 케이크에 직접 사용하는 것은 합리적이지 못하다.

2-2. 여과 평균 비저항값의 측정 방법

위의 식 (1)을 여과에 적용되는 전체 압력 Δp 와 여과매체의 저항 R_m 을 사용하여 표현하면 식 (4)가 된다.

$$\frac{dV}{dt} = q = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av} W + R_m)} \quad (4)$$

여과가 시작되는 순간에는 여과매체 위에 케이크가 형성되지 않았으므로 식 (4)에서 단위 면적당 케이크의 질량 W 는 존재하지 않게 된다. 그 순간 이후에는 여과기를 흘러나온 여액에 포함되어 있던 입자들이 여과매체 위에 케이크를 형성하게 된다. 현탁액과 케이크 그리고 여액의 전체 질량수지와 고형분의 질량수지를 사용하여 아래의 관계를 얻을 수 있다.

$$W = \frac{\rho S}{1 - S/S_c} V \quad (5)$$

여기서 ρ 는 여액의 밀도이고, S 는 현탁액에서의 고형분 질량 분율, S_c 는 케이크의 고형분 질량 분율이다. 이 식을 간단히 하기 위해 여액 단위 부피당 형성되는 케이크 고체의 질량을 C 라고 정의하면 $W=CV$ 가 되며 아래의 식이 성립한다.

$$C = \frac{\rho S}{1 - S/S_c} = \frac{W}{V} \quad (6)$$

여과 진행중 여액의 밀도 ρ 가 변화하는 경우는 드물므로 C 는 현탁액의 고형분 질량 분율 S 와 케이크의 고형분 질량 분율 S_c 에 의해 결정된다. 이 관계를 식 (4)에 대입하면 흔히 Ruth의 식이라고 부르는 식이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = q = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av} CV + R_m)} \quad (7)$$

이 식을 역으로 놓고 정리하면 다음의 식이 된다.

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{\Delta p} \alpha_{av} CV + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \tag{8}$$

적분하고 다시 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{2\Delta p} \alpha_{av} CV + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \tag{9}$$

이 식에 의해 다음과 같이 여과 평균 비저항을 구한다. 여과를 진행시키면서 시작 순간부터의 시간 t 와 각 시간의 여액부피를 측정하여 표를 만든다. 그 후 여액 부피를 여과 면적으로 나누어 V 를 계산하고, 또한 각 데이터의 t/V 를 계산한다. x 축을 V 로 y 축을 t/V 로 하여 그래프를 그린다. 응집물의 여과가 아니고, 여과 도중 침전 속도가 매우 빠른 경우가 아니면 실험 결과는 직선을 잘 나타낸다.

식 (9)에서 이 직선의 기울기 b 는 $\frac{\mu}{2\Delta p} \alpha_{av} C$ 를 의미한다. 그러므로 기울기 b , 여액의 점도, 여과 압력, 그리고 C 의 값에서 여과 평균 비저항 α_{av} 를 구할 수 있다. Fig. 1 앞의 흰 점들 부분이 이 설명에 해당된다. 이 여과 평균 비저항 측정 방법은 거의 80년에 걸쳐 변함없이 사용되고 있다.

이 직선을 외연장하여 y 축과 만나는 절편값은 위의 수식에 의해 $\frac{\mu}{\Delta p} R_m$ 이 된다. 여액의 점도와 여과 압력을 사용하여 여과 도중의 실험값에 반영된 여과매체의 저항 R_m 을 구할 수 있다. 이 방법 또한 80년 이상 사용되고 있으나, 저자[11]는 이에 반대하는 논문을 발표하였다.

2.3. 여과 평균 비저항값의 측정에 대한 분석: Ruth의 공식에 대한 분석

Ruth의 식을 분석하기 위해 식 (7)에 (6)의 내용을 대입하면 다음 식이 된다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu \left(\alpha_{av} \frac{\rho S}{1 - S/S_c} V + R_m \right)} \tag{10}$$

흔히 사용하는 Büchner funnel을 비롯한 실험실에서 사용하는 대부분의 여과 장치는 여과 기간에 압력이 변화하지 않는 정압여과(定壓濾過)를 수행한다. 또한 여과 기간 동안 압력 Δp 가 일정한 값을 유지해야 앞 절에서 서술한 방법으로 정확한 여과 평균 비저항값이 측정될 수 있다. 여과 시작 순간에 순간적으로 원하는 압력으로 만드는 것이 거의 불가능하나, 일반적으로 실험실에서는 1-2초 이내에 원하는 압력이 이루어져 큰 문제는 없다. 아스피레이터(aspirator)를 사용하여 감압 여과를 수행할 경우 평균적인 압력은 유지되나 압력의 끊임없는 순간적인 변동(fluctuation)이 생긴다. 구조 자체가 연약한 응집물을 여과시킬 경우에는 이 순간적인 압력의 변동이 여과 평균 비저항값에 큰 영향을 줄 가능성이 있다. 본 연구에서는 40 L 부피의 공기 탱크를 여과기와 아스피레이터 사이에 장치하여 이 현상을 막았다. 자세한 내용은 뒤의 실험장치 부분에서 설명한다.

거의 모든 입자 현탁액의 여과에서 여액의 점도 μ 는 그 온도의 물의 점도와 큰 차이가 없다. 단지 응집물의 여과에서 과잉의 응집체가 물에 그대로 남았을 경우는 다음의 두 가지 가능성이 있다. 응집체의 길이가 짧은 경우는 여액의 점도를 조금 올리는 정도의 영향을 주게 될 것이다. 이 경우는 여액의 점도를 측정하고 이 값을 위의 식에 대입하면 정확한 평균 비저항값이 측정된다. 응집체의 분자량이 10^8 g/mol 이상이면 약간의 응집체가 액체 내에 남아 있어도 이 응집체가 여과 케이크 혹은 여과매체에 걸려 쌓이는 경우가 있다[6]. 이 경우 여액의 점도는 물과 거의 같으나, t/V 와 V 의 선의 기울기 b 가 매우 증가하여 여과 평균 비저항값이 매우 커진 것으로 측정된다.

여액의 밀도 ρ 는 물과 같고, 온도에 따라 아주 작게 변화한다. 그러므

로 온도에 따른 물의 밀도값을 대입하면 큰 오류가 없다.

통상적으로 현탁액의 고형분 분율 S 는 여과가 시작될 때의 값을 사용한다. 만일 여과 진행 과정에서 어떤 이유에서든 케이크에 공급되는 현탁액의 농도가 변화하면 변화된 S 값을 사용해야 정확한 여과 평균 비저항값이 결정될 수 있다. 여과 도중 침전이 있는 경우, 케이크에 들어가는 S 의 값은 초기의 값과 다를 수 있다. 이는 본 논문의 중요한 주제 중의 하나이다.

이와는 별개의 문제로 여과기에 현탁액을 넣고 조금 시간이 경과한 후에 여과를 시작하면 그 동안 약간의 고체입자들이 여과매체 위에 침전한다. 이 경우는 여과 초기에 침전물이 여과되므로 초기의 S 값은 침전물의 고형분 분율이 되어야 한다. 이 또한 본 논문의 주제 중의 하나이다.

입자 현탁액의 여과에서 형성되는 케이크의 고형분 질량 분율 S_c 는 거의 0.8 정도의 크기를 가지는 경우가 많다. 현탁액의 고형분 질량 분율 S 가 0.01이라면 S/S_c 의 값은 0.0125로 동일한 분모에 있는 항인 1보다 대단히 작은 값이다. 이런 경우 S/S_c 의 값을 생략하는 수가 흔히 있다. 케이크의 고형분 분율을 측정하지 않아도 되어 편리하기 때문이다.

그러나 응집물의 여과에서는 서론에서 언급한 난점으로 인하여 케이크의 고형분 질량 분율 S_c 를 결정할 수 없다. 즉 케이크와 침전 응집물이 육안으로 구분되지 않으며 여과가 끝나는 즉시 압착이 시작되어 여과 기간에 형성된 케이크가 여과 대상 물질이나 압착물과 구분되지 않는다. 이 난점을 해결하기 위해 여과-투과 실험 방법을 개발하였다[4]. 이 실험으로 결정된 응집물의 여과에 의해 형성된 케이크의 두께를 결정할 수 있으며, 이 두께를 사용하여 케이크의 고형분 질량 분율을 계산할 수 있다. 응집물의 성질에 따라 차이가 있으나 이렇게 결정된 S/S_c 의 값은 0.3-0.5 정도로 입자 현탁액의 여과의 경우보다 20배 이상 크다[4]. 그러므로 과거에 S/S_c 를 영(零)이라고 가정하여 측정 한 여과 평균 비저항값은 두 배까지의 오차가 있었을 가능성이 있다. 이점이 응집물의 여과의 평균 비저항값을 측정하는 데 가장 큰 오류를 초래할 수 있는 요소이다.

위의 식 (10)의 R_m 은 여과매체의 저항을 의미한다. Carman[9]은 여과매체의 저항이 초기에 케이크가 형성될 때 여과매체에 약간의 입자가 끼어 결정이 된다고 설명하였다. 그 후의 연구에서는 케이크가 모든 입자를 분리하므로 여과매체 자체의 저항은 여과 기간동안 변화하지 않는다고 생각하였다. 실험실에서나 현장에서 여과를 수행할 때 여과매체에 따라서 여과 속도가 매우 느려지는 경우가 있는 것을 자주 경험한다. 이것은 여과매체가 입자에 의해 계속적으로 막히는 현상이라고 해석할 수 있다.

Yim 등[11]은 입자 현탁액의 여과에서 ‘잘 선정된 여과매체’가 가져야 할 조건을 간단히 분석하고 있다. 응집물의 여과에서는 여액에 남아 있는 과량의 응집체가 케이크의 좁은 공간이나 여과매체에 부착되어 여과 속도를 감소시키는 경우가 있다. 현장에서는 여과매체를 전혀 통과하지 못할 정도로 큰 크기의 응집제도 사용되고 있다.

2.4. 여과-투과 실험방법

저자[12]는 여과 케이크를 분석하기 위해 ‘여과-투과(filtration-permeation)’ 실험 방법을 제안하였다. 보통의 여과를 수행하여 여과 케이크를 형성시키고, 형성된 케이크에 입자 제거수를 통과시키는 방법이다. 실험기간 동안 시간 t 와 여액의 부피 V 를 계속적으로 측정한다. 이 방법으로 구한 전형적인 실험 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 여과-투과 결과는 식 (10)과 같이 V 와 t/V 로 나타내는 것보다 식 (9)의 V 와 dt/dV 로 나타내는 것이 분석하기 쉽다. 미분 형식의 표현 dt/dV 를 자세한 측정의 실험 데이터를 사용하여 $\Delta t/\Delta V$ 로 계산하였다.

그림 왼쪽의 선형으로 증가하는 흰 점들은 여과 기간을 나타낸다. 이 기간에서 얻어진 기울기를 식 (9)에 대입하여 여과 평균 비저항값을 구할 수 있다. 오른쪽의 x 축에 평행하게 보이는 검은 점들은 형성된 케

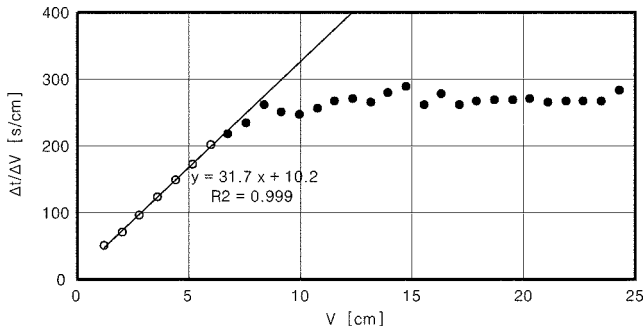


Fig. 1. A typical experimental result of filtration-permeation of bentonite floc flocculated with cationic flocculant at 1 atm.

크에 입자 없는 물이 투과(permeation)하는 과정을 나타낸다. 이 때는 여과기에 있던 모든 입자, 혹은 응집물이 모두 케이크로 변화한 후이므로 투과 기간 중의 케이크의 양 W 가 일정하게 유지된다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av}W + R_m)} \quad (4)$$

그러므로 정압여과의 경우 식 (4)에서 Δp 가 일정하게 유지되고, 여액의 점도도 일정하며, 여과매체의 저항 R_m 이 일정하면 여액의 속도 dV/dt , 또는 이 값의 역수 $\Delta t/\Delta V$ 는 일정해야 한다. 투과 기간에는 현탁액의 모든 입자가 케이크로 변화하였으므로 W 의 값을 상당히 크게 실험하는 것이 가능하다. 이 경우 $\alpha_{av}W$ 의 값이 R_m 보다 매우 크게 되므로 R_m 을 생략할 수 있다. 그러므로 이 식에 의해 투과기간의 평균 비저항값 α_{av} 를 쉽게 계산할 수 있다.

이 방법은 투과 기간의 투과 속도에서 구한 평균 비저항값이므로 다른 조건, 즉 여과 기간에 발생하는 침전, 혹은 여과가 시작되기 전에 존재할 수 있는 사전(事前) 침전 등의 영향에서 벗어날 수 있다는 장점이 있다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 여과 실험장치

실험에는 감압식과 가압식 여과 장치를 모두 사용하였다.

3-3-1. 감압식 여과장치

보통 사용하는 Büchner funnel과 동일한 장치를 다음의 두 부분을 변형시켜서 사용하였다. 대부분의 여과 셀(filtration cell)은 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 여과매체와 동일한 원기둥형의 여과 셀을 제작하여 사용하였다. 여과 셀의 직경은 4 cm, 높이는 16 cm로 200 cm³의 현탁액을 담을 수 있다. Fig. 2는 실험에서 사용한 감압식 여과 장치이다.

여과도중 감압을 위한 아스피레이터(aspirator)에 의한 압력의 요동을 방지하기 위해 여과기와 아스피레이터 사이에 40 L 공기 탱크를 설치하였다. 여과를 시작하기 전 여과기와 공기탱크 사이의 밸브를 잠그고 아스피레이터를 가동시켜 공기 탱크의 절대압력을 0.5 기압보다 조금 더 낮게 한다. 그 후 아스피레이터와 공기 탱크 사이의 밸브를 잠그며 아스피레이터를 정지시킨다.

현탁액을 여과 셀에 넣고 동시에 여과기와 공기 탱크 사이의 밸브를 열어 여과를 시작한다. 여과는 공기 탱크의 감압으로 진행된다. 그러므로 여과 도중 압력의 요동은 없다. 통상적으로 200 cm³의 여과와 200 cm³의 투과를 수행하였으므로 실험이 끝나면 400 cm³의 부피가 증가한 셀이 된다. 공기 탱크의 용량이 40,000 cm³이고 여액 수기의 부피가 400 cm³이므로 늘어난 여액으로 인한 압력차의 감소는 약 1%가 된

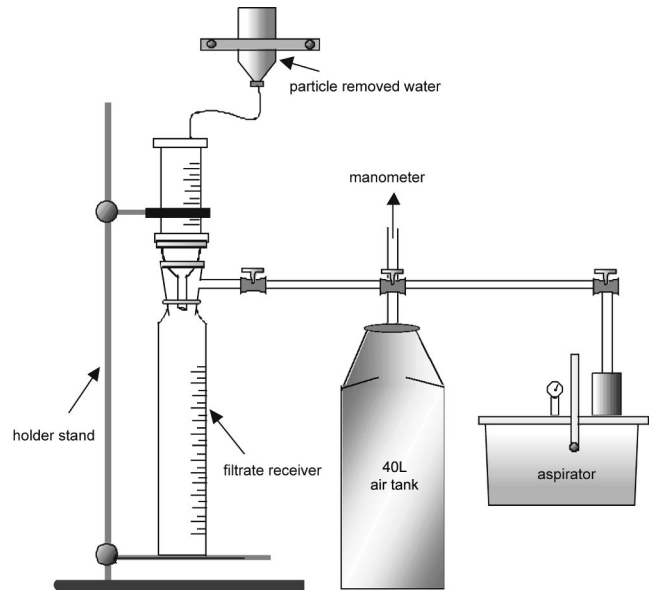


Fig. 2. Schematic diagram of a vacuum filtration apparatus.

다. 이 범위 내에서는 정압(定壓)이 이루어지지 않는 셀이나 압력의 요동을 막기 위해 이 방법을 사용하였다.

투과를 위한 입자 제거수는 여과 셀의 윗 부분에서 여과가 80% 정도 진행된 후부터 케이크를 다치지 않도록 조심스럽게 첨가하였다.

3-3-2. 가압식 여과장치

Fig. 3와 같이 여과 셀을 밀봉하여 가압할 수 있게 제작하였다. 현탁액을 넣고 위의 마개를 닫고 밀봉하는 데는 1-2분이 걸렸으나, 항상 동일한 조건을 유지하기 위해 현탁액을 넣은 2분 후에 여과를 시작하였다.

여과만 수행할 경우는 여과 셀 상부의 연결부위에 원하는 압력의 질소를 연결시켜 여과를 수행하였다. 볼베에 들어있는 고압의 질소를 원하는 압력으로 감압시키는 감압장치를 사용하여 원하는 압력을 만들었다. 보통의 감압장치는 여과셀의 압력이 설정시켜 놓은 압력보다 약간 낮은 압력이 되어야 기체를 더 공급한다. 이런 장치에서는 여과 도중 압

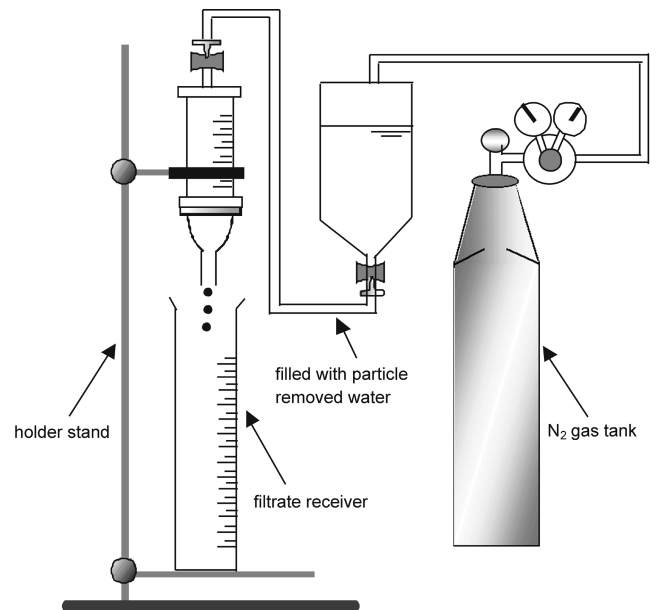


Fig. 3. Schematic diagram of pressure filtration apparatus.

력이 낮아졌다가 높아지는 과정이 반복된다. Fig. 1의 투과 기간에 완전히 동일한 값의 $\Delta t/\Delta V$ 가 측정되지 않은 것은 이러한 압력의 차이로 인한 것이다.

여과-투과를 수행할 경우 투과를 위한 입자 제거수를 미리 400 mL의 빈 용기에 넣어 여과기와 질소 분배 사이에 설치하였다. 여과기와 물이 든 용기 사이의 연결관에도 입자 제거수를 채워 놓았다. 압력은 입자 제거수가 들어있는 용기에 공급된다. 여과가 진행되면서 나간 여액만큼의 입자 제거수가 여과 셀에 공급이 되어 자연스럽게 여과-투과가 연이어 진행된다. 이 장치는 주로 응집물의 여과에서 사용하였다. Fig. 3에 이 장치의 개요를 나타내었다.

3-2. 여과매체와 시료

여과매체는 Advantec(東洋濾紙株式會社(일본))에서 제조된 Advantec Toyo 5A, Advantec Toyo 5C, 미국의 Whatman No. 4, Whatman No. 5, Whatman GF/C, 그리고 Micro filtration system사의 cellulose acetate재질의 microfiltration막(MF막), polysulfone재질의 MF막, 그리고 Bonmac 회사의 커피 필터와 프랑스의 Sartorius사에서 제조한 공극 직경 8 μm 여과막을 사용하였다. Sartorius사의 제품은 응집 침전물의 여과에만 사용하였다.

첫 번째 여과 대상 물질로는 Jin chemical사(한국)에서 제조한 탄산칼슘을 사용하였다. 이 탄산칼슘을 Malvern 회사의 Mastersizer를 사용하여 입도 분석한 결과 전체 구성 입자가 부피 평균 입자 크기로 0.3-50 μm 사이에 분포하고 있었다. 이 범위 내에서는 어느 특정 크기의 입자가 많은 분포를 차지하는 것이 아니라 전반적으로 넓게 분포되어 있으며, 평균 입자경은 8.54 μm 이었으며, 1 μm 이하의 크기를 가지는 입자는 10% 정도였다.

응집물을 만들기 위해서는 bentonite 입자를 현탁액으로 만들어 사용하였다. 이 벤토나이트 volclay는 American Colloid Company 제품으로 자기 중량의 12-15배의 물을 흡수하여 Coulter counter에 의해 19.3 μm 보다 큰 것이 33.4%, 12.1 보다 큰 것이 52.9%, 7.63 보다 큰 것이 72.3%, 4.81 보다 큰 것이 85.3%로 나타났다.

응집제로는 양이온 응집제 Cyanamid Superfloc(Superfloc) C 581을 사용하였다. 분자량은 10^5 - 10^6 g/mol로 고분자 응집제로는 분자량이 작은 편이다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 입자와 여과매체 세공의 상대적인 크기가 여과 평균 비저항에 미치는 영향

여과 평균 비저항값이 여과매체에 의해 영향을 받는 정도를 알기 위해 8 종류의 여과매체에 1 wt%의 탄산칼슘 현탁액을 0.5 기압의 감압으로 여과-투과시키는 실험을 수행하여 Fig. 4에 실험 결과를 나타내었다.

또한 여과매체에 입자 제거수를 투과시켜 측정 한 투과 속도, 여과매체의 공간율과 두께를 사용하여 계산한 여과매체의 평균 공극 직경을 Table 1에 제시하였다. 사용한 여과매체 중 가장 큰 공극을 가진 것은 Bonmac사의 커피 필터로 직경이 4.2 μm 였고, Whatman No. 4, Toyo 5A, Whatman GF/C의 순서로 크기가 작게 나타났다. Whatman GF/C는 2.2 μm 의 직경을 가지고 있는 것으로 측정되었다. 그 다음으로는 Whatman No. 5가 1.2 μm , Toyo 5C가 0.95 μm 로 거의 동일한 직경을 가지고 있었다. 비교를 위해 실험한 microfiltration에 사용하는 polysulfone 재질의 막은 0.51 μm , cellulose acetate재질의 막은 0.43 μm 의 직경이었다.

Fig. 4의 모든 실험의 초기에 증가하는 직선 부분이 여과 기간이고, 후기에 거의 일정한 $\Delta t/\Delta V$ 값을 가지는 부분이 입자 제거수의 투과 기간이다. 여과-투과 실험 결과에서 Whatman No. 5와 Toyo 5C만이 완전히 다른 경향을 보이고, 나머지 6개는 거의 동일한 결과를 보였다.

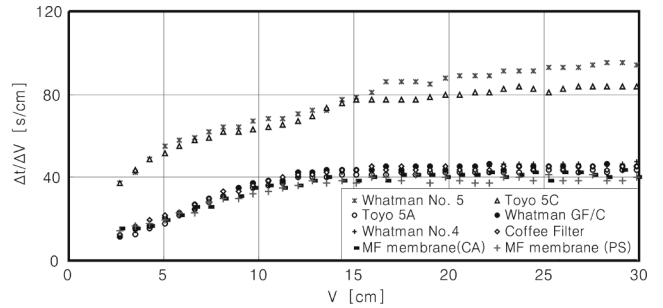


Fig. 4. Filtration-permeation of 1 wt% calcium carbonate suspension with various filter medium at 0.5 atm.

Table 1. Average pore diameters of various filter medium

Filter medium	Pore diameter(μm)
Coffee filter(bonmac)	4.2
Whatman No. 4	3.6
Toyo 5A	2.8
Whatman GF/C	2.2
Whatman No. 5	1.2
Toyo 5C	0.95
Microfiltration membrane(PS)	0.51
Microfiltration membrane(CA)	0.43

평균 공극 직경이 상대적으로 큰 여과매체와 작은 여과매체의 실험 결과가 모두 아래쪽의 거의 같은 부분에 포함되어 있다. 특히 공극의 평균 직경이 4.2 μm 인 커피필터와 0.43 μm 인 MF막의 여과-투과 실험 결과가 거의 동일하게 나온 것은 주목할만한 결과이다. 이것은 전통적인 케이크 여과 이론에 부합하는 것으로, 여과매체를 구성하는 공극의 크기가 여과 평균 비저항 값에 영향을 미치지 않는다는 것을 증명해 주고 있다. 이 실험에서 여과매체는 단지 케이크를 받쳐주는 역할을 하고 있으며, 여과는 케이크에서 일어난다는 것 또한 입증되었다고 생각한다. 대체로 여과 기간의 평균 비저항값과, 투과 기간의 평균 비저항값은 크게 차이가 나지 않는다.

그러나 평균 공극 직경이 각각 1.2 μm 와 0.95 μm 로 측정된 Whatman No. 5와 Toyo 5C의 여과-투과 실험에서는 여과 기간의 기울기에 의한 평균 비저항값이 큰 것은 물론, 투과 기간에도 $\Delta t/\Delta V$ 의 값이 대단히 크며 조금씩이나마 계속 상승하였다. 이 그래프 x축의 7 cm에 해당하는 90 cm³의 여과에 필요한 시간이 통상적인 여과 결과를 나타내는 Toyo 5A의 경우에는 1분 50초였으나, 특이한 결과를 나타내는 Whatman No. 5의 경우는 4분 23초로 2.4배의 시간이 걸렸다.

이 두 종류의 여지에서 일어난 현상을 다음과 같이 분석하였다. 이 현탁액에 존재하는 여지의 공극 크기와 비슷한 입자들이 처음부터 여지에 막히기 시작한 것이 이 두 여지의 여과-투과 속도를 느리게 하였고 생각한다. 공극의 크기가 더 큰 커피 필터와 같은 여과매체에서는 작은 입자가 공극으로 빠져나가면서 케이크가 형성되어 여과매체의 막힘 현상이 거의 없었다고 해석하였다. 또한 공극의 크기가 아주 작은 MF 막에서는 사용한 현탁액 내의 입자가 더 커서 작은 공극의 막힘 현상이 없었다고 판단하였다.

이상의 분석을 종합하면 작은 공극을 가진 여과매체를 사용했을 경우 여과가 늦어지는 것이 아니며, 큰 공극을 가진 여과매체를 사용했을 경우 여과가 더 빨라지는 것도 아니다. 주의해야 할 점은 현탁액 내에 여과매체를 막을 수 있는 크기의 입자가 많이 존재해서는 안 된다는 것이다. 그러므로 현장에서 여과를 수행할 여과매체로 미리 실험실에서 여과 실험을 수행하여 적합성을 판단하는 것이 바람직하다. 위에서 수행한 실험에서는 실험 과정에 어느 정도의 침전이 수반되기 때문에 실험

에서 측정된 평균 비저항값을 수치적으로 자세히 검토하지 않았다. 응집물은 이미 작은 입자들이 응집되어 있으므로 응집물의 크기는 여과매체의 공극의 크기보다는 매우 큰 경우가 대부분이다. 그러므로 응집물의 크기와 여과매체의 공극의 크기의 비율에 따라 여과 평균 비저항값이 큰 영향을 받지는 않는다. 그러나 응집체의 양이 부족하여 응집되지 않은 작은 입자가 존재하는 경우, 위와 같이 여과매체의 종류에 따라서는 여과속도가 매우 느려질 수 있다. 또한 응집에 사용하는 응집제의 분자량이 큰 경우 액체 속에 남아 있는 잉여 응집제가 여과매체에 걸려 여과 속도가 매우 느려질 수 있다. 이런 경우에 대하여는 뒷 부분에서 분석할 것이다.

4-2. 현탁액의 초기 농도가 여과 평균 비저항 측정에 미치는 영향: 여과 진행중 침전속도의 영향

여과를 시작할 때의 고체의 질량 농도가 1 wt%, 2 wt%, 3 wt%, 4 wt%, 8 wt%, 15 wt%인 현탁액에 대해 여과-투과 실험을 수행하였다. 실험한 모든 결과를 그림에 나타내기는 어려우므로 대표적인 몇 개의 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림의 형태는 모두 전형적인 여과-투과 실험 결과였다. 이 그림으로 보면 높은 농도의 실험 결과에서는 여과와 투과기간의 구분이 확연히 이루어지나, 낮은 농도인 1 wt% 현탁액의 실험 결과에서는 여과 기간과 투과 기간의 구분이 안 된다. 그러나 y축을 확대하면 1 wt% 현탁액의 실험 결과도 여기의 8 wt% 현탁액의 실험 결과와 같이 뚜렷하게 여과와 투과 기간이 구분된다.

4-2-1. 여과기간의 C 값과 직선의 기울기 분석
여과 실험 결과를 분석하기 위하여 먼저 식 (6)에 의해 각 농도에 대한 여액 단위 부피당 형성되는 케이크의 고체의 질량 C 값을 구하였다. 그리고 실험의 여과 기간에 해당하는 데이터의 직선 식의 기울기를 구하였다. 이 값들을 Table 2에 나타내었다(이 두 가지 값과 여액의 점도, 여과 압력으로 식 (8)을 사용하여 여과 평균 비저항값을 계산할 수 있다).

Fig. 5에서는 실험 결과를 V와 Δt/ΔV에 대해서만 나타내었으나, Table 2에는 실험 결과를 V와 t/V의 그래프로도 정리하여 구한 여과기간의 기울기도 제시하였다. 여기에서 S₀는 여과가 시작되는 순간의 현탁액의 고형분 질량 분율이다. 현재까지 모든 연구자들은 이 초기의 S₀가 전체 여과기간에 걸쳐 유지된다고 생각하고, 여과기간 동안의 C 값을 식 (6)에 의해 이 S₀로부터 계산하였다.

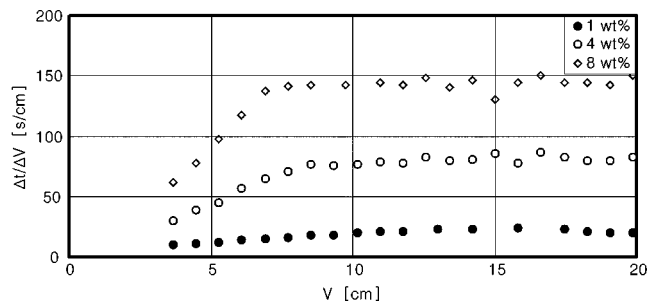


Fig. 5. Filtration-permeation of 1, 4, 8 wt% calcium carbonate suspension at 0.5 atm.

Table 2. The values of C based on S₀ and the slopes during filtration

S ₀ [-]	C by S ₀ [kg/m ³]	Slope(Δt/ΔV) [×10 ⁴ s/m ²]	Slope(t/V) [×10 ⁴ s/m ²]	Slope(Δt/ΔV) slope(t/V)
0.01	10.1(1.0)	1.51(1.0)	0.73(1.0)	2.07
0.02	20.5(2.0)	3.49(2.3)	1.62(2.2)	2.15
0.03	31.2(3.1)	6.92(4.6)	3.19(4.4)	2.17
0.04	42.1(4.2)	9.69(6.4)	4.37(6.0)	2.22
0.08	88.9(8.8)	23.5(15.6)	9.80(13.4)	2.40

Table 2의 낮은 농도에서는 C의 값이 현탁액 내의 초기 고형분 질량 분율 S₀와 거의 같으나, 높은 농도에서는 상당한 차이가 나고 있다. 이것은 식 (6)에 의한 결과로서 높은 농도, 특히 침전물의 여과와 같이 높은 농도의 여과에서는 특히 C값에 주의해야 할 것으로 생각된다. C를 나타내는 줄에서 괄호 속의 값은 실험한 가장 낮은 농도인 1 wt%의 C 값인 10.1 kg/m³을 기준으로 하여 다른 농도의 C 값이 이것의 몇 배인가를 나타낸 것이다. 초기 농도 8 wt%는 1 wt%에 비해 초기 농도로는 8배이지만 C 값으로는 8.8배이다.

실험 결과에 적용시키기 위해 식 (8)의 dt/dV를 Δt/ΔV로 대체하면 아래의 식이 된다.

$$\frac{\Delta t}{\Delta V} = \frac{\mu}{\Delta p} \alpha_{av} CV + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \tag{11}$$

여과 기간에 완전히 이상적(理想的)인 여과가 행해진다면 Table 2의 기울기가 이 식을 따라야 한다. 즉 식 (11)에서 (μ_{av}/Δp)C의 값이 기울기가 된다. 여러 농도의 실험에서, 괄호 속의 점도, 평균 비저항값, 압력은 동일하므로 기울기는 단지 C값에 비례해야 한다. Table 2의 세 번째 열에 실험의 Δt/ΔV값에서 구한 기울기를 나타내었다. 또한 이 열의 괄호 속에 S₀값 0.01의 기울기에 비해 각 농도에서의 기울기가 몇 배인가를 표시하여 놓았다. 식 (11)에 따르는 이상적인 여과에서는 C를 나타내는 열의 괄호 내의 숫자와 세 번째 줄의 괄호내의 숫자가 일치해야 한다. 그러나 실험에서는 높은 농도에서의 실험일수록 두 번째 열과 세 번째 열의 괄호 내의 숫자의 차이가 더 심해져서 S₀값이 0.08인 경우에는 두 번째 열의 값이 8.8, 세 번째 열의 값이 15.6으로 이론보다 77% 더 큰 기울기를 나타내었다. 우리는 기울기와 C값 그리고 점도와 압력으로 평균 비저항값을 계산하므로 결과적으로 평균 비저항값이 이만큼 더 큰 값으로 측정된다.

위와 비교를 위해 적분에 의해 성립된 식 (9)을 다시 적는다.

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{2\Delta p} \alpha_{av} CV + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \tag{9}$$

이 방법에 의해 실험에서 측정된 기울기는 (μ_{av}/2Δp)C가 된다. 이 값도 역시 C에만 의존해야 한다. Table 2의 4번째 열에 측정된 기울기를 적고, 괄호 속에 동일한 기준으로 계산한 값을 적었다. 괄호 내의 값들이 왼쪽 줄의 값과 동일하지는 않으나 상당히 비슷하며, C를 나타내는 줄과는 상당히 다르다.

결국 위의 비교는 농도에 따른 기울기가 식 (11) 또는 (9)와 정확하게 일치하지는 않는다는 것을 보여준다. 이것을 분석하는 방향은 두 가지가 있다. 그 하나는 농도가 짙은 현탁액일수록 이론과 실험의 차이가 큰 것으로 보아 기울기의 차이가 농도의 영향이라고 가정 할 수 있다. 또는 농도가 증가함에 따라 평균 비저항값이 증가한다는 가정을 할 수 있다.

식 (11)에 의하면 V와 Δt/ΔV의 그래프의 여과 기간의 기울기는 (μ_{av}/Δp) C이고, 식 (9)에 의하면 V와 t/V의 그래프의 기울기는 (μ_{av}/2Δp) C으로 실험이 정확한 경우 이 기울기의 비율이 2이어야 한다. Table 2에 이 실험에 의한 기울기의 차이를 적어 놓았다. 낮은 농도인 S₀가 0.01에서는 이 비율이 2.07로 거의 이론에 가까우나, 높은 농도인 S₀가 0.08에서는 2.40까지 증가한다. 이것은 위의 식이 잘 성립하지 않게 하는 요인이 현탁액의 초기 고형분 질량 분율 S₀에 있다는 것을 의미한다.

4-2-2. 측정된 평균 비저항값

위의 기울기에서 구한 여과 기간의 두 가지 평균 비저항값과, 식 (4)에 의한 투과 기간의 평균 비저항값, 그리고 식 (11)에 의한 여과매체의 저항을 Table 3에 나타내었다.

여기서 α_{avf}(Δt/ΔV)는 V와 Δt/ΔV의 그래프의 여과 기간의 기울기에서 얻은 여과 평균 비저항값이고, α_{avf}(t/V)는 V와 t/V에서 얻은 것이다.

Table 3. Filtration-permeation results with various concentrations of calcium carbonate suspension

$S_o[-]$	$\alpha_{avf}(\Delta t/\Delta V)[\times 10^{10}m/kg]$	$\alpha_{avf}(t/V)[\times 10^{10}m/kg]$	$\alpha_{avp}(\Delta t/\Delta V)[\times 10^{10}m/kg]$	Intercept($\Delta t/\Delta V$)[s/m]	$R_m[\times 10^{10}m^{-1}]$
0.01	7.48	7.23	6.16	446	2.23
0.02	8.51	7.91	6.77	195	0.976
0.03	11.1	10.2	6.17	-13.1	-0.0658
0.04	11.5	10.4	6.5	-449	-2.25
0.08	13.2	11.0	5.74	-2580	-12.9

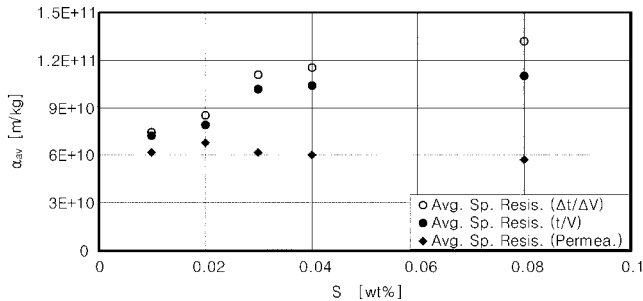


Fig. 6. Average specific cake resistances by calcium carbonate suspension measured with the filtration of various concentrations at 0.5 atm.

또한 $\alpha_{avp}(\Delta t/\Delta V)$ 는 V 와 $\Delta t/\Delta V$ 의 그래프에서 투과 기간의 투과 속도와 식 (4)를 사용하여 계산한 평균 비저항값이다.

현재 통용되는 이론에 의하면 평균 비저항값이 농도의 영향을 받지 않으므로, 이 표의 모든 평균 비저항값이 동일하게 측정되어야 한다. 그러나 $\alpha_{avf}(\Delta t/\Delta V)$ 는 초기 현탁액의 고형분 분율의 증가에 따라 $7.48 \times 10^{10} m/kg$ 에서 $13.2 \times 10^{10} m/kg$ 로 76%나 증가하였고, $\alpha_{avf}(t/V)$ 는 이것 보다는 작은 정도이나 역시 고형분 분율의 증가에 따라 상당한 정도의 평균 비저항값의 증가를 보였다. 이 결과는 앞의 기술기에서 예측할 수 있는 사항으로 같은 물질이라도 농도가 다르면 여과에 의해 현재의 분석방법으로 평균 비저항을 측정할 경우 농도를 명기해야 함을 보여준다. 이 내용을 더 명확히 하기 위해 Fig. 6에 그림으로 모든 평균 비저항값을 나타내었다.

Fig. 6에 의하면 여과기간에 측정된 평균 비저항들과는 달리, 투과 기간에 측정된 α_{avp} 값은 어느 정도의 편차를 보이기는 하나 여러 농도의 현탁액에 대해 거의 비슷한 값이므로 초기 고형분 분율 S_o 의 영향을 받지 않는다고 판단하였다. 즉, 투과 기간에 측정된 평균 비저항값(average specific cake resistance)은 이미 형성된 케이크에서 측정하였으므로 그 앞의 과정, 즉 농도에 의해 달라지는 침전 속도의 영향을 받지 않는다고 결론을 내렸다. 이 실험 결과는 과거 수십 년간 통용되어온 이론, 즉 여과 평균 비저항값은 현탁액의 농도에 따라 변화하지 않는다는 학설과 일치한다.

그러므로 농도의 영향을 받을 가능성이 있는 물질의 평균 비저항값의 측정에는 여과-투과 방법이 더 믿을 수 있는 결과일 가능성이 있다. 또한 투과 기간에 변하지 않는 유속을 측정하는 것이므로 여과기간에 정확한 기술기를 측정하는 것보다 간단할 수 있다.

4-2-3. 침전이 수반되는 여과 기간 동안의 현탁액의 고형분 분율 S에 대한 분석

이상과 같이 여과를 통해 측정된 평균 비저항값이 현탁액의 초기 고형분 분율에 따라 변화하는 실험결과, 또는 변화하는 이유에 대해서는 저자의 연구[13]를 제외하고는 보고된 바가 없다. Fig. 6과 같이 투과 기간에 측정된 평균 비저항값은 실험 오차 이내의 값을 보이는 반면, 여과 기간에 측정된 평균 비저항값이 농도에 따라 다른 값을 보이는 것에 대해 다음과 같이 가정하였다. 즉, 여과 기간에도 실제로는 투과 기간과

같은 평균 비저항값을 가지고 있으나, 식 (11)이나 식 (9)의 계산을 위해 대입한 값의 일부가 정확하지 않아 다른 값의 평균 비저항값이 얻어진 것이다.

위의 여과 실험 도중의 현탁액을 관찰한 결과 거의 항상 침전이 일어난다는 것을 알 수 있었다. 현탁액의 초기 농도가 낮으면 자유침강(free settling)에 가까운 형태의 침전이 일어나 현탁액과 상등액(supernatant)의 침전계면(solid blanket)이 확연히 나타나지 않으나, 초기 농도가 높으면 완전한 침전계면이 형성되는 간섭침전(hindered sedimentation)을 보였다. 그러나 어느 경우에도 여과 도중에 현탁액의 윗부분에 맑은 상등액이 형성되는 것이 관찰되었다.

상등액의 존재는 여과기간에 케이크로 들어가는 현탁액의 고형분 분율 S 가 초기 고형분 분율 S_o 와는 달랐다는 것을 의미한다. 이를 입증하기 위해 전체 현탁액 부피의 절반이 여과된 순간에 대해서 생각해 보기로 한다. 현재 여과이론에 사용되고 있는 현탁액의 고형분 분율 S 는 여과기간 전체에 걸쳐 초기 현탁액의 고형분 분율 S_o 와 같다고 가정하고 있다. 그러면 절반이 여과된 순간 남아있는 반의 현탁액의 고형분 분율 역시 S_o 가 되어야 한다. 그런데 이 순간의 상등액은 상당한 부분의 고체가 거의 없는 상태로 관찰된다. 현탁액의 S_o 가 보존된다면 고형분은 상등액 아래쪽의 현탁액에 모여있을 것이며 이 높은 농도의 현탁액이 그 순간 케이크로 들어가고 있는 것이다. 이 케이크로 들어가는 농도는 초기와 같을 수 없다. 적어도 이 순간은 상당히 큰 고형분 분율 S 가 케이크에 공급되고 있다고 결론을 지을 수 있다. 이와 같은 논리가 현탁액의 반이 여과된 때만 성립하는 것이 아니다. 적어도 극히 초기만 제외된 모든 여과 기간에 초기 고형분 분율 S_o 가 케이크에 공급되는 것이 아니라고 결론지을 수 있다. 그러므로 침전이 수반되는 여과에서는 초기 고형분 분율 S_o 에서 식 (6)에 의해 여과기간의 여액 단위 부피당 형성되는 케이크의 고체의 질량 C 를 계산하는 것은 명백한 오류가 된다.

4-2-4. 현탁액의 농도와 여과기간에 측정된 평균 비저항값의 이론적인 분석

위의 논리에 의하면 침전이 있을 경우 여과 기간 동안 케이크에 공급되는 현탁액의 고형분 분율 S 의 값은 침전 속도와 관계가 있어야 한다. 침전 이론과 실험에 의하면 농도가 낮은 현탁액의 침전 속도가 농도가 높은 현탁액의 침전 속도보다 빠르다. 우리의 현탁액의 침전 실험에서도 이와 동일한 결과를 얻었다. 이것만으로 보아서는 침전의 영향이 낮은 농도의 현탁액의 여과에서 더 현저하게 나타나야 할 것으로 생각된다. 그러나 이와 달리 Fig. 6에서는 낮은 농도의 현탁액의 여과에서 측정된 평균 비저항값이 침전이 배제된 투과에서 측정된 평균 비저항값과 거의 같은 값을 나타내고, 높은 농도의 현탁액에서 측정된 평균 비저항값은 상당히 다르게 측정된다. 이 현상에 대한 설명을 위해 Table 4에 $90 cm^3$ 의 여액이 여과되는 시간을 각 농도에 대해 적었다.

1 wt% 현탁액의 침전 속도가 빠르다고 하나 여과가 74초이면 거의 끝나므로 침전에 의한 영향을 크게 받지 않을 수 있다. 그래도 약간의 침전의 영향을 받으므로 Fig. 6에서와 같이 여과 기간에 측정된 평균 비저항값과 투과 기간에 측정된 값이 약간의 차이를 보이는 것이라고 해석하였다. 8 wt% 현탁액의 여과 시간은 493초이므로 침전 속도가 조금 늦다고 하여도 긴 기간의 여과에서 침전에 의한 영향을 강하게 받는다. 그 결과로 케이크에 공급되는 현탁액의 고형분 분율 S 는 초기 현탁액의 고

Table 4. Filtration time needed for 90 cm³ filtrate

Concentration	Time(s)
1%	74
2%	113
3%	194
4%	244
8%	493

형분 분율 S_0 보다 상당히 큰 값이 된다. 그 결과 식 (6)에 의해 실제로는 C 값이 더 크고, 결과적으로 실험에서의 여과 기간의 기울기 ($\mu\alpha_w/\Delta p$) C 도 자연히 크게 측정되어야 한다. 결국 이 현상이 측정으로 확인된 것이 Table 2에 있는 농도의 증가에 따른 기울기의 증가이다.

4-2-5. 침전의 영향에 의한 절편값의 변화

여과 초기에 대한 정밀한 측정이 가능하면 위에서 언급한 현상을 확인할 수 있다. 즉 초기에 빠르게 진행되는 여과에서는 침전의 영향이 작고, 초기 고형분 함량 S_0 가 유지될 수 있으므로 C 값이 작다. 그러므로 기울기($\mu\alpha_w/\Delta p$) C 가 후기에 비해 작은 값이어야 한다. 그러나 이 기간은 빠른 유속, 많은 유량, 급격한 유속의 변화로 인하여 실험적인 측정이 매우 곤란하다[14]. 그 후 침전의 영향에 의해 S 값, 그에 의한 C 값이 변하는 기간이 있다. 이 기간 역시 실험적인 측정이 어렵다. 그 다음에야 어느 정도 안정된 새로운 큰 값의 S 가 계속 유지되고, 그에 따른 C 가 유지되며, 결과적으로 기울기($\mu\alpha_w/\Delta p$) C 가 보다 큰 값으로 계속 유지되는 기간이 실험 결과로 나타난다. 이 결과가 Fig. 5의 4 wt%, 8 wt%의 실험 결과이다. 초기의 결과는 실험에 나타나지 않고, 이미 큰 기울기가 유지되는 V 값에서부터 측정이 이루어졌다.

이 그림에서는 잘 알아보기 어려우나 직선인 여과 실험 부분을 연장하여 y 축과 만나는 절편 값을 Table 3에 함께 나타내었다. 농도가 커질수록 절편 값이 작아져서, 상당한 정도의 음의 값까지 나타난다. 식 (11)에 의하면 이 절편은 $(\mu/\Delta p) R_m$ 이다. 여기에서의 점도와 압력차 그리고 저항 R_m 은 항상 양의 값을 가져야 한다. 더욱이 동일한 압력차에서 행한 실험에서 농도가 증가함에 따라 저항값이 점차로 줄어 음의 값이 된다는 것은 단순히 저항의 변화로는 설명될 수 없다.

그러나 이 현상은 앞에서 설명한 다음의 내용을 입증한다. 즉, 초기에 측정되지 않은 작은 기울기로 증가한다. 그 후 측정이 시작되는 시점에서는 침전의 영향에 의해 큰 기울기를 가지는 직선만이 얻어진다. 이렇게 얻어진 직선을 외연장하여 y 축과 만나는 점에서 R_m 을 구하므로 이 값은 당연히 음의 값을 가지게 된다. 여과 속도가 낮은 높은 농도의 현탁액의 여과일수록 이 현상은 커진다. 이는 본 이론을 뒷받침하는 실험적인 증거의 하나이다.

여기서 도출할 수 있는 또 하나의 결론은 식 (11)과 실험에 의한 절편으로 여과매체의 저항 R_m 을 측정하는 것이 침전이 있는 실험에서는 옳지 않다는 것이다. 이 절편으로 여과매체의 저항을 측정하는 방법은 오랜 동안 사용되었으며, 학부용 교과서에도 실려있다[10].

4-2-6. 응집물의 여과에서의 농도와 침전의 영향

응집의 목적 중의 하나가 침전 속도를 증가시키기 위함이다. 그러므로 응집시킨 후 미리 침전시키지 않고 여과하는 경우는 매우 드물다. 본문에서는 응집 후 침전시킨 침전물을 여과시키는 경우만을 생각한다. 이 때는 침전으로 인하여 여과 대상 침전물의 농도가 확정되어 적어도 여과가 지속되는 기간에는 동일하게 유지된다. 즉 여과 기간의 여과 대상물질의 고형분 함량 S 는 여과를 시작할 때의 값 S_0 가 거의 동일한 값으로 유지된다.

그러므로 우리가 원하는 농도의 응집물의 침전을 만드는 것은 매우 어렵다. 농축조에 많은 양의 응집물을 오랜 시간 쌓아 고형분 함량을 증가시키는 방법이 흔히 사용된다. 그러나 이 방법으로 제조된 응집물의 침전은 내부적인 성질 자체가 변화하였으므로 동일한 기준으로 앞에서

와 같은 실험을 통하여 연구할 수가 없다. 화학적인 방법으로 제조한 응집물의 경우는 농축조에 있는 동안 응집이 풀어지며, 생물학적인 응집물의 경우에는 생물학적인 변화 등을 거치게 되어 여과 평균 비저항값 자체가 변화한다[15].

4-3. 사전(事前) 침전이 여과 평균 비저항값에 미치는 영향

Fig. 2의 감압식 여과에서는 여과 셀에 현탁액을 부어 넣고 곧 여과를 시작할 수 있다. 그러나 Fig. 3과 같은 가압식 여과에서는 여과 셀에 현탁액을 넣은 후 뚜껑을 닫고 밀봉하는 작업을 해야 한다. 이 작업이 흔히 1분에서 2분이 걸린다. 이 시간의 차이가 여과 평균 비저항값에 미치는 영향을 알기 위해 감압식 여과 장치에서 현탁액을 넣은 후 그대로 방치하여 일정 시간의 침전(사전 침전)을 시킨 후 여과-투과 실험을 수행한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

이 그래프를 분석하면 다음과 같은 점을 알 수 있다.

첫째는 사전 침전이 있는 여과 기간에서는 그렇지 않은 경우에 비해 같은 V 값에서 $\Delta t/\Delta V$ 값이 크다. 즉 유속이 상당히 느리다. 사전 침전이 있는 경우는 사전 침전에 의해 쌓인 침전물이 먼저 여과된다. 침전물은 현탁액에 비해 수분 함량이 상당히 적으므로 침전물의 여과에 의해 나오는 여액의 부피는 매우 적어 측정되기 어렵다. 그 후 현탁액의 여과에 의해 여액이 나오게 되므로 동일한 V 에서의 케이크의 양이 사전침전이 없는 경우에 비해 더 많다. 그러므로 유속이 느려 $\Delta t/\Delta V$ 값이 크게 된다. 이 현상은 사전 침전 기간이 길수록 더 심해진다.

두 번째는 사전 침전이 있는 경우 더 작은 V 값에서 여과기간이 종료된다. 사전 침전 기간에 침전된 나머지 현탁액에 대한 여과만이 이루어지므로 당연한 결과이다. 결국 어느 정도 이상의 시간 동안 사전침전 후 여과를 하면 여과 기간의 테이터를 얻지 못한다. 입자가 거의 모두 침전되어 침전물이 여과되기 때문이다. 이 때는 침전물의 고형분 함량이 S 값이 되어 C 가 매우 커지므로 여과기간의 기울기가 매우 커진다. 즉 첫 번째 테이터가 측정되기 이전 시간에 이미 여과가 종료되어 실험에서 측정되는 V 에서는 투과만이 일어날 뿐이다. Fig. 7의 4분 이상의 사전 침전이 있는 경우가 이에 해당한다.

세 번째는 사전 침전이 있는 경우 동일한 V 값에서 여과 속도가 느려지므로 침전의 영향을 더 받게 된다. 그 결과 S 와 C 가 증가하여 그래프의 기울기가 커지게 되어 초기 고형분 함량 S_0 로 여과 평균 비저항값을 계산하면 매우 틀린 결과를 얻게 된다. Fig. 7에서 사전 침전이 없는 경우의 기울기는 $9.69 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ 이고 1.1분 사전 침전을 시킨 경우의 기울기는 $1.29 \times 10^5 \text{ s/m}^2$ 로 상당히 크다. 결국 평균 비저항값에 이 정도의 오차가 발생한다는 의미이다. 또한 절편도 사전 침전이 없는 경우는 -4.49 s/m 이며, 1.1분 사전 침전을 시킨 경우는 -6.26 s/m 로 더 커진다. 이 결과들은 앞에서 제안한 침전의 효과를 동일한 농도에서 실험으로 입증한 것이 된다.

응집물의 여과에서는 앞에서 분석한 바와 같이 침전조에서 이미 사전

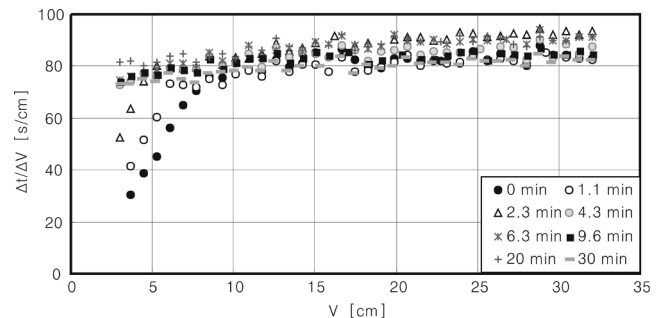


Fig. 7. Filtration-permeation of 4 wt% calcium carbonate suspension with various pre-sedimentation time.

침전을 거친 침전물을 여과하는 것이므로 이를 다시 사전 침전시켜 실험한다는 것은 거의 의미가 없다.

4-4. 응집물의 여과에서 평균 비저항값의 결정

입자가 너무 작아서 여과 평균 비저항값이 매우 크거나, 그 외의 다른 이유로 여과 평균 비저항값이 매우 큰 경우 흔히 응집제(flocculant)를 사용하여 응집시킨 후, 침전과 여과 등의 고액분리 조작을 수행한다. 또한 폐수처리장의 잉여 활성 슬러지(activated sludge) 혹은 그것을 소화한 슬러지의 탈수에도 침전, 여과, 압착 등의 고액 분리공정이 사용된다.

4-4-1. 침전된 응집물의 여과 현상 분석과 여과-투과 실험에 의한 케이크의 형성

침전된 응집물(floc)의 여과와 입자 현탁액의 여과는 다음과 같은 큰 차이점이 있다. 입자 현탁액의 여과에서 여과 대상인 입자 현탁액은 빛을 상당한 정도 투과시키므로 빛을 투과시키지 않는 여과 케이크와 시각적으로 확연히 구분된다. 그러나 침전된 응집물의 여과에서는 여과 대상인 침전 응집물과 여과에서 생성되는 케이크가 모두 빛을 통과시키지 않아 둘 사이의 차이가 시각적으로 구분되지 않는다.

Fig. 8에 벤토나이트 현탁액을 양이온 응집제로 응집시킨 후, 침전시킨 침전물을 여과한 결과를 나타내었다. 침전물은 여과에 의해 점차로 케이크로 변화하며, 모든 침전물이 케이크로 변화하면 케이크의 압착의 과정이 연이어 진행된다. 그러므로 여과 셀의 외부에서 침전물의 높이 변화를 관찰하는 것으로는 여과 과정과 압착 과정의 구분이 불가능하다. 그 결과 여과 도중 배출된 여액양에 해당하는 케이크의 양을 결정지을 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 가압식 여과장치에 입자 제거수를 채운 통을 연결하고, 이 통의 입자 제거수에 압력을 가해 여과와 투과를 수행하였다. 이것이 여과-투과(filtration-permeation) 실험이며 그 결과가 Fig. 1이다. 즉 입자 제거수를 연속적으로 여과 셀에 가해 주어서 여과 후에 압착이 시작되는 것을 방지하였다. 형성된 케이크에 입자 제거수를 통과시키는 투과(permeation) 시간의 투과 속도가 계속 일정하게 유지되는 것으로 보아 일단 형성된 케이크의 성질은 그 후에 변화하지 않고 일정하게 유지되는 것으로 생각할 수 있다.

이상의 방법을 사용하면 여과셀에 넣은 침전물을 모두 케이크로 형성시킬 수 있으며, 형성된 케이크가 압착의 과정으로 진행되는 것을 막을 수 있다. 이 때 케이크의 부피, 질량 그리고 이 상태의 케이크에 대한 투과 속도를 실험적으로 결정할 수 있다.

4-4-2. 케이크의 두께와 C값 결정

Fig. 1 실험의 경우 여과가 시작될 때의 여과기 속에 넣은 침전 응집물의 높이는 147 mm이었으며, 여과가 종료된 후의 고형분 부분 즉 케이크의 두께는 70 mm였다. 이 케이크 두께는 이후의 지속적인 투과에 의해서도 거의 변화하지 않았다. 이 값들로 계산한 여과 대상 침전 응집물의 고형분 질량 분율 S는 0.021이고, 케이크의 고형분 질량 분율 S_c는 0.044였다. 이는 응집물의 여과에서는 고형분의 질량 분율이 크게 증

가하지 않음을 의미한다. S가 0.01인 탄산칼슘 입자 현탁액을 여과하면 S_c가 0.8 정도의 케이크가 얻어지는 것에 비하면 상당히 작은 정도의 고액분리가 이루어지는 것이다. 그러므로 통상적인 필터 프레스나 벨트 프레스에 의한 침전 응집물의 고액분리에서 얻어지는 높은 S_c는 여과 후에 상당한 정도의 압착 조작이 수행되었다는 것을 의미한다.

침전된 응집물을 여과한 현재 실험의 경우 여과에서 얻어지는 S/S_c값은 0.48로 1 wt% 탄산칼슘 현탁액 여과의 경우의 0.013에 비하면 매우 큰 값이다. 입자 현탁액의 여과에서는 식 (6)을 사용하여 여액 부피당 형성된 케이크 고체 질량 C를 구할 때 S/S_c값이 분모에 있고 1에 비해 상당히 작은 값이므로 통상적으로 생략하는 경우가 많다. 그러나 이 침전된 응집물의 여과에서 S/S_c값을 생략하면 C가 거의 절반으로 계산이 되며, 그 결과 여과 평균 비저항값이 거의 두 배 틀리게 계산된다.

4-4-3. 침전된 응집물의 여과 평균 비저항값

위의 S 값과 S_c값을 사용하여 식 (6)으로 여액 부피당 형성된 케이크의 고체 질량 C값을 계산하면 40.2 kg/m³이 된다. Fig. 1의 기울기는 식 (11)의 (μ_{av}/Δp) C 이므로 C값과 여과 압력 그리고 여액의 점도를 대입하면 여과 시간의 평균 비저항 α_{av,f}가 계산되며 그 값은 7.99×10¹¹ m/kg이다.

투과 기간에는 여과 셀에 주어진 입자가 모두 케이크로 변화하였다고 생각할 수 있다. 그러므로 식 (4)에 측정된 여액의 투과 속도 dV/dt, 여과 압력, 그리고 케이크 질량과 여액의 점도값을 대입하여 투과 시간의 평균 비저항값을 구할 수 있다. Fig. 1의 투과 시간의 뒤쪽 8개 데이터의 평균 투과 속도 254 s/cm로 계산한 투과 시간의 평균 비저항 α_{av,p}는 8.07×10¹¹ m/kg이다.

침전된 응집물을 여과기간에 여과 식을 사용하여 측정된 평균 비저항값과 투과기간에 투과 식으로 측정된 비저항값이 실험 오차 이내로 일치하므로 위에서 사용한 모든 가정이 타당성을 가지고 있다고 결론지었다. 특히 이 경우 여과 시간의 케이크의 고형분 함량 S_c를 통상적인 경우와 같이 생략하면 여과 시간의 평균 비저항 α_{av,f}는 4.18×10¹¹ m/kg로 실제값의 52%로 계산된다.

5. 결 론

케이크 여과에서 정확한 여과 평균 비저항값을 측정하기 위해 현탁액의 여과와 침전된 응집물의 여과를 이론적, 실험적으로 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 현탁액 내의 입자와 여과매체의 세공의 상대적인 크기가 여과 평균 비저항에 상당한 정도로 영향을 미치며, 이 영향을 배제하기 위해서는 입자의 크기보다 아주 작은 공극을 가지는 여과매체를 사용하거나 아주 큰 공극을 가지는 여과매체를 사용하는 것이 바람직하다.
- (2) 여과매체가 적절히 선정된 경우에도 현탁액의 초기 농도에 따라 여과 도중 침전 속도가 달라진다. 이 침전속도가 여과 평균 비저항값에 미치는 영향을 분석하였으며, 정확한 평균 비저항값을 측정하기 위해서는 여과-투과 방법을 사용할 것을 제안하였다.
- (3) 여과 시작 전의 사전(事前) 침전의 정도가 여과 평균 비저항값에 상당한 영향을 미치거나 심지어는 여과기간의 실험결과를 얻지 못할 수도 있음을 실험을 통하여 보였다.
- (4) 침전된 응집물의 여과에서 정확한 여과 평균 비저항을 구하기 위한 조건으로 케이크의 두께를 정하는 방법, 케이크의 고형분 함량을 정확히 측정해야 한다는 것을 밝혔다.

감 사

본 연구는 2000년도 인하대학교 서해안환경연구센터(RRC) 연구비로 연구되었으며, 지원에 감사드립니다.

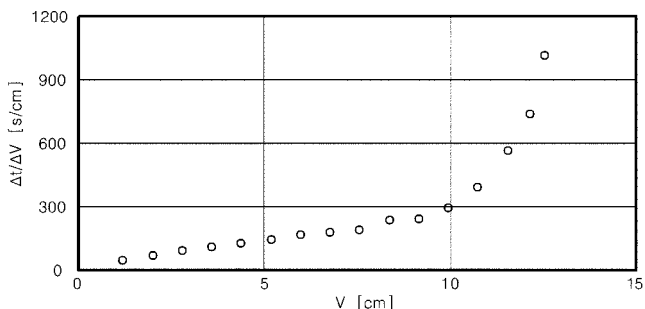


Fig. 8. Filtration of sedimented bentonite floc flocculated with cationic flocculant.

참고문헌

1. Ruth, B. F., Montonna, R. E. and Montillon, G. H.: *Industrial and Engineering Chemistry*, **23**(7), 850(1931).
2. Tiller, F. M. and Kwon, J. H.: *AIChE J.*, **44**(10), 2159(1998).
3. Sperry, D. R.: *Metallurgical and Chemical Engineering*, **12**(4), 161 (1917).
4. Yim, S. S.: 5th World Filtration Congress, Nice, France, 91(1990).
5. Yim, S. S.: *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 308(1999).
6. Yim, S. S. and Kwon, Y. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **38**, 839(2000).
7. Tiller, F. M., Hsyung, N. B., Shen, Y. L. and Chen, W.: 5th World Filtration Congress, Nice, France, 80(1990).
8. D'Arcy, H. P. G.: "Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon" Victor Delmont, Paris(1856).
9. Carman, P. C.: *Transactions.-Institution of Chemical Engineers*, 168 (1938).
10. McCabe, W. L., Smith, J. C. and Harriott, P.: "Unit Operation of Chemical Engineering," fifth edition, MaGraw-Hill Book Co.(1995).
11. Yim, S. S., Kwon, Y. D. and Kim, H. I.: *Korean J. Chem. Eng.*, **18**, 741 (2001).
12. Yim, S. S. and Ben Aim, R.: World 4th Filtration Congress, Nice, A1 (1986).
13. Yim, S. S., Lee, S. G. and Kwon, Y. D.: The Fourth Japan-Korea Symposium on Separation Technology, Tokyo, Japan, 781(1996).
14. Yim, S. S. and Kim, J. H.: *Korean J. Chem. Eng.*, **17**, 393(2000).
15. Yim, S. S., Jeong, J. K., Kim, M. R.: *J. of Korean Society of Environ. Eng.*, **8**(2), 75(1986).