

## 여과-투과에 대한 실험적 분석: 여과매체의 종류, 여과매체의 매수, 여과압력의 영향

임성삼<sup>†</sup> · 송연민

인하대학교 사회기반시스템공학부 환경공학전공  
402-751 인천시 남구 용현동 253  
(2011년 6월 21일 접수, 2011년 8월 25일 채택)

## Experimental Analysis on Filtration-Permeation: Influence of the Type and Sheets of Filter Media, and Filtration Pressure

Sung-Sam Yim<sup>†</sup> and Yun-Min Song

Department of Environmental Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea  
(Received 21 June 2011; accepted 25 August 2011)

### 요 약

케이크 여과와 고액분리에서 가장 중요한 지표인 케이크 평균 비저항을 결정하는 방법으로 여과실험을 사용하고 있으나 침전 등의 영향으로 정확한 값을 측정하기 어렵다. 이 연구에서는 조금 더 안정된 방법으로 여과 후 형성된 케이크에 입자제거수를 투과시켜 평균 비저항을 측정하는 여과-투과 실험을 제안한다. 탄산칼슘 1 wt% 현탁액을 사용하여 여과-투과 실험을 8종의 여과매체에 대하여 여과매체 1장과 3장, 압력 0.5 기압과 0.2 기압의 조건에서 각 조건 당 3~5 회씩 동일한 실험을 수행하였다. 그 결과 여과 후 투과에서도 안정된 투과 속도가 측정됨을 확인하였고, 이를 바탕으로 Ruth의 공식을 분석하여 투과기간의 특징을 구명(究明) 하고 여과기간에 발생하는 침전의 영향을 분석하였다. 그 다음, 여과매체 3종을 선택하여 여과와 투과에서의 케이크 평균 비저항값으로 일원배치법에 의한 분석을 하였다. 분석 결과 여과에 의해서는 0.5 기압과 0.2 기압의 케이크 평균 비저항값이 구분되지 않으나, 투과에 의해서는 충분히 구분되었다. 또한 투과기간의 케이크 평균 비저항값들이 여과기간의 그것에 비해 매우 좁은 분포를 가지는 것을 확인했다. 여러 여과매체의 여과 실험결과를 분석하여, 여과매체 저항을 현재의 방법으로 측정하는 것은 큰 의미가 없음을 밝혔고, 유리섬유 여과-투과 실험 결과로 낮은 압력에서 입자의 여과매체 이동 가능성에 대한 분석을 수행했다.

**Abstract** – The average specific cake resistance, the most important indicator for cake filtration and solid-liquid separation, is measured by filtration experiment. But the exact value is difficult to measure because of the other influences such as sedimentation during filtration. This study, a little more stable method named filtration-permeation is proposed for measuring average specific cake resistance. The filtration-permeation is composed of permeation of particle eliminated water through pre-formed cake by filtration. Using 1 wt% calcium carbonate suspension, the filtration-permeation experiments were performed for 8 kinds of filter media at the conditions of 0.5 atm and 0.2 atm, 1 and 3 sheets of filter media. At each specific condition, three to five times filtration-permeation were accomplished. As a result, stable permeation speed is measured. According to this experimental result, the characteristics of permeation and the effect of sedimentation are analyzed with Ruth's equation. The one way analysis of variance (one way ANOVA) is applied to the average specific cake resistances of filtration and permeation obtained with the selected three kinds of filter media. The average specific cake resistances between 0.5 atm and 0.2 atm by filtration do not distinguished, but those by permeation is perfectly distinguished. The experimental results during permeation have a very narrow distribution than that measured during filtration. The analysis of filtration experiments, it was verified that the resistance of filter medium by traditional method is of no significance. Finally, the migration of small particles through the medium composed of fiber glass at low pressure was studied.

**Key words:** Cake Filtration, Filtration-permeation, Average Specific Cake Resistance, Ruth's Equation, Permeation, Filter Medium, Resistance of Filter Medium

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: yimsungsam@inha.ac.kr

## 1. 서 론

케이크 평균 비저항(average specific resistance of cake,  $\alpha_m$ )은 한 물질의 여과, 투과, 압착, 간섭침전, 원심분리 등 고액분리(solid-liquid separation) 특성을 나타내거나, 위의 각 고액분리 공정의 진행 과정을 계산하기 위해 사용되는 매우 중요한 지표(指標)이다[1]. 케이크 평균 비저항은 주로 케이크 여과 실험을 통해 측정되었으므로, 흔히 여과 평균 비저항(average specific resistance of filtration,  $\alpha_{av,f}$ )이라고도 불린다. 그러나 여과에서만 사용되는 것이 아니라 위에 열거한 거의 대부분의 고액분리 공정에서 사용되므로 우리는 케이크 평균 비저항이라는 표현을 사용하기로 한다.

여과 실험 데이터에서 케이크 평균 비저항을 구하는 방법으로는 단위면적당의 여액부피( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ,  $V$ )와 여과 시간( $t$ )의 관계를 그래프로 그리거나, 여액부피( $\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ,  $V$ )와 일정 증분의  $V$ 가 통과하기 위해 걸리는 시간 증가분( $\Delta t/\Delta V$ )의 그래프상의 기울기를 사용한다. 그러나 어떤 방법을 사용하더라도 재현성(reproducibility)에 문제가 있어서 오래 전부터 새로운 방법이 탐구되었다[2].

유일한 대안으로 제시된 방법은 여과에 의해 형성된 케이크에 입자 제거된 물을 통과시키는 여과-투과(filtration-permeation) 실험이었다. Ruth 등의 논문에 의하면 1931년까지 적어도 5 사람의 연구자가 여과-투과 실험을 수행하였으며, 투과 시간이 길어짐에 따라 케이크 평균 비저항이 계속적인 증가를 보였다고 한다[3]. 그 후 Ruth의 1935년 논문에서는 여과 후 투과기간에서 유량이 점차적으로 감소, 즉 케이크 평균 비저항이 점차적으로 증가하는 현상을 실험적으로 측정된 결과를 발표하였다[4]. 이 여러 실험 결과에 의거하여 그는 “완성된 케이크에 물을 통과시키는 방법의 실험 결과로 여과 케이크의 최종 저항을 측정하려는 몇몇 실험자에 의한 시도는 매우 잘못된 결과를 얻을 가능성이 있다”고 결론지었다[4].

여과-투과의 가치를 부정하는 이 Ruth의 결론은 본 저자와 Ben Aim이 1986년 이와 반대되는 실험 결과를 발표할[5] 때까지 진실로 믿어져, 51년에 이르는 이 긴 기간 동안 여과-투과 실험을 발표한 연구자가 없었다. 1990년 Tiller 등에 의해 5<sup>th</sup> World Filtration Congress에서 여과-투과 실험 결과가 발표되었으나[6] 여과기간에 측정된 케이크 평균 비저항의 값과 투과기간에 얻어진 케이크 평균 비저항 값이 두 배 가량 차이가 나는 이유를 설명하지 못했다. 그러나 위의 발표와 같은 곳에서 본 저자는 그 차이가 여과기간에 침전에 의한 것임을 실험으로 입증하는 논문을 발표했다[7].

본 연구에서는 여과-투과 방법을 케이크 평균 비저항을 측정하는 실험으로 확립시키기 위해 여러 종류의 여과매체(filter medium)를 사용하여 여과-투과 실험을 3~5회씩 수행하였다. 그 결과를 사용하여 실험에서 사용한 탄산칼슘 현탁액의 여과에 적합한 여과매체 3개를 선택하고, 부적합한 여과매체에 대한 분석을 수행하였다.

탄산칼슘 현탁액 여과에 적합한 3종류의 여과매체를 사용한 여과-투과 데이터로 통상적인 방법인 여과기간에 측정된 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,f}$  값과, 투과기간의  $\alpha_{av,p}$ 를 통계적으로 분석하여 둘 중 실험 방법으로 더 나은 것을 찾으려 시도하였다.

또한 여과기간의 침전이 여과에 미치는 현상, 3장의 여과매체에 의한 여과의 특성, 현행의 여과매체 저항 측정 방법에 대한 고찰 등이 부수적으로 연구되었다.

## 2. 이 론

### 2-1. Ruth의 공식

케이크 평균 비저항을 구하기 위한 이론으로는 Ruth가 제안한 공식[8]이 사용되며, 이 공식은 처음 제안된 형식에서 표현이 조금 변형되어 식 (1)과 같은 형태로 쓰이고 있다.

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

여기서  $V$ 는 여과매체(filter medium) 단위 면적당 배출 여액(filtrate)의 부피( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )이고,  $t$ 는 여과진행 시간[s]이다.  $\Delta p$ 는 여과에서 소모되는 압력[Pa]이며,  $\mu$ 는 여액의 점도[kg/ms],  $\alpha_{av}$ 는 케이크 평균 비저항[m/kg]이다.  $\rho$ 는 여액의 밀도[kg/m<sup>3</sup>]이다.

$S$ 는 여과 대상 현탁액 속에 있는 고체물질의 질량분율[-]로 이 논문에서 분석 대상이 되는 값이다. 통상적으로는 여과 초기 현탁액의  $S$  값이 여과가 수행되는 전체 과정에 일정하게 유지된다고 가정하고 식 (1)을 사용하고 있다. 그러나 이 논문에서는 이 값이 일정하지 않을 수 있다는 가정에서 출발한다.  $S_c$ 는 케이크를 구성하는 고체물질의 질량분율[-]이다. 마지막으로  $R_m$ 은 여과매체의 저항[m<sup>-1</sup>]이다.

$V$ 를 여액의 부피[m<sup>3</sup>]로 표현하고, 적분 형식으로 적으면 식 (1)은 통상적인 학부 교재[9]에 나오는 식과 동일하다.

### 2-2. Ruth 공식의 분석과, 여과에서 케이크 평균 비저항 $\alpha_{av}$ 의 계산

Ruth 공식을 역으로 하여 정리하면 식 (2)를 얻는다.

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu}{\Delta p} \left( \frac{\rho S}{1 - S/S_c} \right) \alpha_{av} V + \frac{\mu}{\Delta p} R_m \quad (2)$$

이 식을 조금 더 자세히 설명하면 다음과 같다.

정압여과(constant pressure filtration)에서 여과에 소모되는 압력  $\Delta p$ 는 여과 기간 동안 일정한 값을 가진다. Tiller와 Cooper의 분석에 의하면 외부에서 압력을 일정하게 유지시켜 주어도 여과 극(極) 초기에 케이크에 걸리는 압력( $\Delta p_c$ )은 케이크와 여과매체에서 소모되는 압력  $\Delta p$  보다 상당히 작을 수 있다[10]. 그러나 이 기간은 첫 여과 데이터가 측정되기 전의 극 초기에 해당하므로 실험에 의해 측정되기 어렵다. 동일 논문에서 케이크에 걸리는 압력이 작아지면 케이크의 고체물질 질량분율  $S_c$ 도 극 초기에는 약간 작아진다고 분석하였으나[10], 통상적인 실험 데이터를 측정하는 범위에서는  $S_c$ 가 동일한 값을 유지한다.

여액의 점도  $\mu$ 는 질은 용액이거나 특이한 물질을 포함하지 않은 경우 물의 점도와 같다. 본 실험에서는 간간히 점도를 측정하여 물의 점도와 다르지 않다는 것을 확인했다.

식 (2)에 의하면  $\frac{dt}{dV}$ 와  $V$  그래프의 기울기가  $\frac{\mu}{\Delta p} \left( \frac{\rho S}{1 - S/S_c} \right) \alpha_{av}$ 이 되므로, 이 기울기 값을 알면 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av}$ 가 계산된다. 이것이 여과기간의 데이터를 사용하여  $\alpha_{av}$ 를 측정하는 방법이다.

여기에는 여과기간 동안에  $\mu$ ,  $\Delta p$ ,  $\rho$ ,  $S_c$ ,  $S$ 가 변화하지 않고 일정하게 유지된다는 가정이 내재되어 있다. 이 4가지 성질이 일정하게 유지된다는 것은 앞으로 투과 실험 결과에서 입증될 것이다.

그러나 현탁액 내의 고체물질 질량분율  $S$ 가 여과에서 일정한 값, 특히 초기 현탁액의 값을 계속 유지한다는 보장은 하기 어렵다.

Büchner funnel 실험과 같이 여과매체가 수평(horizontal)이며 여과가 연직(鉛直)으로 진행될 때, 여과기간에 침전이 함께 일어나면 케이크에 공급되는 현탁액의 고체물질 질량분율  $S$ 가 변화하지 않는다는 보장이 없다. 그럼에도 불구하고 현재까지 모든 연구자와 현장 엔지니어가 이 가정을 사용하고 있다. 우리는 이에 대해 고찰해 볼 것이다.

Ruth의 식 (1)과 이것을 변화시킨 식 (2)는 현탁액의 입자들이 액체와 함께 케이크에 공급되는 시간까지, 즉  $S$ 가 영이 아닌 경우에만 성립한다. 만일 침전에 의해 상등액(supernatant)이 생기고, 이 상등액이 케이크를 통과하게 되면 위의 두 식은 사용할 수 없다. 이는 두 식의  $S$ 에 영을 대입해보면 쉽게 알 수 있다.

Tiller와 Cooper에 의하면 앞에서 말한 여과 극 초기에는 케이크에 걸리는 압력( $\Delta p_c$ )의 강하로 인하여  $\alpha_{av}$ 가 약간 작아진다는 이론적인 결론을 얻었으나[10], 측정된 적이 없는 극 초기의 현상이므로 우리의 실험에서는 발견할 수 없었다.

위와 동일한 방법으로, 식 (2)에 의해  $\frac{dV}{dV}$ 와  $V$  그래프의 절편은  $\frac{\mu}{\Delta p} R_m$ 이 된다. 현재 학부 교재에서는 여과매체의 저항  $R_m$ 을 결정하는 표준적인 방법으로 제시되어 있다[9]. 이 교재는 1960년대의 1판부터 2005의 7판까지 모두 위와 동일한 방법을 사용하므로 참고문헌에는 중간 정도인 5판의 사항을 적었다. 물론 다른 교재에서도 마찬가지로 방법을 사용한다. 그러나 이 논문에서는 실험결과에 의하여 이 방법의 타당성을 검증할 것이다.

### 2-3. 형성된 케이크에 입자 없는 물의 투과

앞에서 언급했던 바와 같이 여과매체가 수평으로 놓여 있는 경우 여과를 수행하는 기간에 침전이 동시에 일어나면, 여과 대상이었던 모든 입자가 케이크를 형성한 후에 상등액이 이미 형성된 케이크를 통과하게 된다. 우리는 이 투과기간을 증가시키기 위해 상등액에 입자가 없는 맑은 물(입자 제거수)를 매우 조심스럽게 첨가하였다. 입자 제거수가 이미 형성된 케이크를 통과하는 투과(permeation)기간에는 Ruth가 1933년 발표한 다음의 식 (3)이 사용될 수 있다[11].

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(\alpha_{av}W + R_m)} \quad (3)$$

여기서  $W$ 는 여과매체 단위면적당 케이크의 고체질량[kg/m<sup>2</sup>]이다.

여과 조작의 경우, 여과가 시작될 때는 케이크가 여과매체 위에 존재하지 않으므로  $W$ 가 영이고, 여과가 진행됨에 따라  $W$ 가 증가한다.

거의 모든 연구자는 식 (3)을 Darcy의 식에서 Ruth의 식 (2)로 가는 과정으로만 생각하여 식의 전개에만 사용하였고, 케이크 평균 비저항값  $\alpha_{av}$ 를 측정하는 목적으로 사용하지 않았다. 본 연구자는 식 (3)을 투과 기간에  $\alpha_{av}$ 를 측정하는 용도로 처음 사용하였다[5]. Ruth 등[2,3] 그리고 Tiller 등[6]도 식 (3)을 사용한 것으로 보이나, 두 사람 모두 이 방법으로 측정한  $\alpha_{av}$ 는 여과에서 측정한 값과 일치하지 않으므로 사용할 수 없다고 하였다. 이 논문의 가장 큰 주제는 식 (3)을 사용하여 측정한  $\alpha_{av}$ 가 케이크의 비저항을 더 정확하고 정밀하게 나타낸다는 것을 많은 실험을 통하여 입증하는 것이다.

그러나 지금 논의하는 투과 기간에는 처음 현탁액에 있던 입자들이 모두 케이크로 변화하였고, 이 케이크에 입자 없는 물이 통과, 즉 투과(透過)하고 있다. 이 때는 식 (3)의 우변의  $\Delta p$ ,  $\mu$ ,  $\alpha_{av}$ ,  $W$ ,  $R_m$ 이 모두 변화하지 않고 일정한 경우에 한(限)하여, 좌변의  $\frac{dV}{dt}$ 의 실험값이 변화하지 않고 일정한 값을 나타낸다. 투과 기간에는 모든 입자가 케이크를 형성하고 있으므로  $W$ 의 값이 최대값이어서 식 (3)의

$\alpha_{av}W$  값이  $R_m$  값에 비하여 매우 크므로 수식에서  $R_m$ 을 생략하여도 무리가 없는 경우가 대다수이다. 이점도 또한 실험에 의해 이 논문에서 증명될 것이다.

Ruth는 1935년 면적이 182 cm<sup>2</sup>인 여과매체 위에 형성된 0.32 cm의 실리카 층에 일정 압력으로 투과실험을 행한 결과 700 cm<sup>3</sup>의 물이 통과하는 동안 유량이 0.2 cm<sup>3</sup>/s에서 0.00374 cm<sup>3</sup>/s로 감소하는 결과를 얻었다[4]. 이를 근거로 앞에서 이미 언급한 “완성된 케이크에 물을 통과시키는 방법의 실험 결과로 여과 케이크의 최종 저항을 결정하려는 몇몇 실험자에 의한 실험은 매우 잘못된 결과를 얻을 가능성이 있다[4]”는 결론을 내렸다. 그 후 본 연구자와 Ben Aim이 1986년에 위의 결론과는 달리, 투과 기간에 일정한 유량을 가지는 경우에 대한 보고[5]를 할 때까지 이에 대하여 발표된 논문이 없었다. 그 후 이미 언급한 바와 같이 1990년 Tiller 등이 저자와 동일한 내용을 발표하였으나, 식 (2)에 얻은 여과 기간에 구한  $\alpha_{av}$  값이 투과 기간에 구한  $\alpha_{av}$  값의 거의 두 배로 측정되는 현상에 대한 설명을 하지 못하였다[6]. 이 차이가 여과기간에 존재하는 침전의 영향에 의한 것임을 저자는 실험을 통하여 입증하였다[7]. 이에 대해 실험을 통해서 다시 언급할 것이다.

## 3. 실험

### 3-1. 실험장치

실험장치는 통상적인 실험실의 Büchner funnel을 다음과 같이 개량하여 사용하였다.

거의 모든 Büchner funnel은 높이에 비해 많은 양의 현탁액을 담기 위해, 여과매체가 있는 곳의 직경보다 그 위 쪽 부분의 직경을 더 크게 만들었다. 즉, 현탁액 용기에 직경이 커지는 부분이 존재한다. 여과 도중에 침전이 존재하는 경우에는 이 확대부분에 입자들이 쌓여, 침전하는 입자의 일부가 그곳에 남게 된다. 이런 단점을 개량하기 위해 우리는 직경의 변화가 없는 원통형의 용기를 제작하여 사용하였다. 이 원통의 직경은 4.05 cm 였다.

Büchner funnel 실험에서는 aspirator를 사용하여 압력을 조절한다. 그러나 이 방법은 작동 시 압력의 미세한 진동(震動, fluctuation)이 없을 수 없으며, 이 결과 형성되는 여과 케이크와 압력의 관계를 정확히 측정하는 것은 매우 어렵다. 우리 실험에서는 40 L 용량의 통을 원하는 압력으로 만들고, 그 통의 감압으로 여과를 진행하였다. 여과 200 cm<sup>3</sup>, 투과 200 cm<sup>3</sup>를 진행하였으므로 전체 과정에서 400 cm<sup>3</sup>의 부피가 증가한다. 그러므로 여과 시작에서 투과 종료까지  $\Delta p$ 에 1%의 압력 변화가 생긴다. 전체 평균 압력으로 계산하면 실제 압력의 오차는 0.5%이다.

이 실험의 장치는 원래의 Büchner funnel 실험장치와 크게 다르지 않으며, 과거 저자의 논문에 그림이 실려 있으므로[12] 이곳에서는 그림을 실지 않았다.

### 3-2. 여과투과 실험 방법

먼저 여과 셀(filtration cell)에 200 cm<sup>3</sup>의 현탁액을 넣는다. 여과 실험을 수행하며 여액의 부피가 10 cm<sup>3</sup> 씩 증가하는 때의 시간을 측정하였다. 이 실험의 경우에는 초기에는 유량이 빠르므로 40 cm<sup>3</sup> 정도에서부터 시간을 측정할 수 있었다. 170 cm<sup>3</sup>의 여액이 모아지는 때부터 여과 셀의 윗 쪽 벽에 매우 조심스럽게 입자 없는 물을 200 cm<sup>3</sup>를 첨가하여 여과 후 투과가 연속하여 일어나게 하였다.

처음부터 대략 200 cm<sup>3</sup> 정도의 여액이 여액수기(濾液受器)에 모일 때까지는 여과이고, 그 다음 400 cm<sup>3</sup> 가까이 여액수기에 모일 때까지가 투과기간이다. 이때까지 여액 수기의 액체가 매 10 cm<sup>3</sup> 씩 증가할 때마다 처음부터의 시간을 기록한다.

### 3-3. 실험에 사용한 고체입자와 여과매체

현탁 고체로는 Jin Chemical 사(한국)의 시약용 탄산칼슘을 사용하였다. 탄산칼슘은 여과현상의 연구에 광범위하게 사용될 뿐 아니라, 고체 입자 중에서는 상당한 정도의 압축성을 가지고 있으므로 압력에 의한  $\alpha_m$ 의 변화가 잘 측정되는 장점이 있다. 우리는 압력 변화 실험을 수행하려 하므로 이 성질이 필요하다. 흔히 사용되는 고령토(kaolin)는 압축성이 작아 압력의 효과가 잘 나타나지 않는 단점이 있다. 입도분석기 Malvern Mastersizer를 사용하여 측정한 부피 평균 입자경은 8.54  $\mu\text{m}$ 였고, 0.5~30  $\mu\text{m}$  사이에 분포했으며, 1  $\mu\text{m}$  이하가 부피 %로 10%였다. 크기 분포는 전반적으로 넓게 퍼져 있었다.

여과매체로는 다음의 8종류가 사용되었다. Advantec Toyo 5A, Advantec Toyo 5C, Whatman No. 4, Whatman No. 5는 종이의 원료가 되는 식물성 섬유 기반의 여과매체이고, Whatman GF/C는 유리 섬유(glass fiber)로 만들어진 여과매체이다. 이 5종의 여과매체는 실험실의 여과 실험에 가장 흔히 사용된다. Bonmac coffee filter는 원두커피를 걸러내는 필터의 한 종류이다. 깨끗한 여과매체에 입자 제거의 투과속도와 투과 압력, 매체의 두께, 공간을 등으로 계산한 평균 세공(細孔, pore) 직경은 Toyo 5C가 2.4  $\mu\text{m}$ , Bonmac coffee filter 6.1  $\mu\text{m}$ , Whatman No. 4가 6.2  $\mu\text{m}$ 였다. 유리섬유로 만들어진 Whatman GF/C는 평균 세공 직경이 3.9  $\mu\text{m}$ 였다.

실험 용도로 cellulose acetate membrane filter와 고분자 물질인 polysulfon membrane filter도 케이크 여과에 사용하였다. 앞서와 동일 방법으로 측정한 평균 세공 직경은 각각 0.39  $\mu\text{m}$ 와 0.86  $\mu\text{m}$ 였고, 이는 제조사에서 제공한 직경 0.5  $\mu\text{m}$ 와 약간의 차이는 있으나, 이 크기의 막에서는 만드는 단위(lot)에 따라 이 정도의 차이는 발생할 수 있으며, 실험 조건에 따라서도 차이가 생긴다.

Toyo 5C는 2.4  $\mu\text{m}$ , Whatman No. 5는 1.4  $\mu\text{m}$  였는데, 이 여과매체는 현재의 탄산칼슘 여과에서 특이한 현상을 보였다.

이 8종의 여과매체로 모든 실험을 다 수행한 것은 아니고, 대표적인 조건에서의 실험 결과에서 탄산칼슘 현탁액의 케이크 여과에 알맞은 것을 세 종류 골라 여과-투과 특성을 분석하였다.

### 3-4. 실험조건

여과 압력은 0.5 기압과 0.2 기압 두 종류로 한정하였다. 0.5 기압은 감압여과에서 가장 많이 사용하는 압력이고, 0.2 기압은 압력에 따른  $\alpha_m$ 와 그 외의 여과 특성의 변화를 알아보기 위함이었다.

현탁액의 고체함량은 1 wt%로 모든 실험을 수행하였다. 임성삼 등의 논문에 발표된 1%에서 8%까지 실험 결과[13] 중 침전의 영향이 비교적 적은 농도를 선정한 것이다. 이보다 작은 농도에서는 여과속도가 너무 빨라 다른 현상이 수반되어 정확한 여과 결과를 얻을 수 없으며, 높은 농도에서는 여과시간이 길어지므로 침전의 영향이 크게 된다.

이 실험의 특징으로는 여과매체 1 장을 사용한 여과-투과 실험과 3 장을 사용한 여과-투과 실험을 6 종류의 여과매체에 대해 수행한 것이다. 앞의 2.1 절에서 언급한 학부 교재에 있는 이론이 옳다면, 여과지의 저항이 식 (2)를 사용한  $\frac{dt}{dV}$ 와 V 그래프의 절편은  $\frac{\mu}{\Delta p} R_m$ 에서

측정되어야 한다. 여과매체 3장의 저항은 1장의 저항보다 클 것이므로 절편의 크기가 이에 상응하여 조금이라도 크게 나타나는 것이 정상이다. 앞으로 실험 결과의 분석에서 이 부분을 검토할 것이다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4-1. 여과-투과 실험 결과의 분석

#### 4-1-1. 전형적인 여과-투과 실험 결과

전형적인 여과-투과 실험 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

이 실험은 1 wt% 탄산칼슘 현탁액으로 5기압에서 실험한 결과이며, Toyo 5A 석 장을 겹쳐놓아 여과매체로 사용하였다.

실험 초기의  $\Delta t/\Delta V$ 가 직선적으로 증가하는 부분이 여과기간이고,  $\Delta t/\Delta V$ 가 거의 일정한 값이 되는 거의 수평 직선 부분이 투과 기간이다.

여과기간의 첫 데이터는 빠른 유속으로 인한 여액의 출렁임 등으로 정확하지 않으므로 제외하고, 그 다음의 6개의 데이터로 직선을 그렸을 때 결정계수  $R^2$ 은 0.9969이므로 충분한 정도의 직선성이 있다고 판단된다. 회귀분석을 한 결과 유의확률은 0.0000036으로 V와  $\Delta t/\Delta V$  사이에는 강한 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 표준잔차도 절대값의 최대값이 1.55라서 문제가 되는 점은 없었다.

첫 데이터를 포함하여 7개로 회귀분석을 하는 것은 다른 현상을 섞어 넣는 것이므로 의미가 없다고 생각했다. 첫 데이터를 제외하고 그 다음 7개의 데이터를 사용하여 회귀분석을 하니  $R^2$ 은 0.9724로 상당히 떨어졌고, 유의확률은 0.0000433으로 나빠졌으므로 6개의 데이터를 사용한 결과를 채용하였다. 대체로 거의 모든 연구자의 여과 실험 데이터 개수는 4, 5개가 많고, 6개 정도를 사용한 예도 간혹 있다.

확정된 직선의 기울기와 식 (2)를 사용하여 여과기간의 케이크 비저항  $\alpha_{m,f}$ 을 계산한 결과  $2.52 \times 10^{11}$  m/kg이었다.

투과기간의 분석은 뒤에서 14개의 데이터를 취하였다. 이 데이터 중 첫 번째 데이터에 이르기까지 약 265 cm<sup>3</sup>의 액이 여액수기에 모였으므로 처음 첨가한 200 cm<sup>3</sup>의 현탁액에 있던 입자들은 모두 케이크로 변화하였다고 생각할 수 있고, 시각적으로도 이 때에는 투과 대상인 케이크 위의 액체에 입자가 포함되어 있지 않은 것이 확인되었다. 투과 후반의 3 점이 그 외의 11점 보다 조금 위에 있는 것은 10 cm<sup>3</sup>의 여액이 흘러나오는 데 시간이 1초 더 걸린 결과로 확인되었다. 이로 미루어 앞에 언급했던 여과 첫 데이터에서의 벗어남도 1초의 오차에 의한 것일 가능성이 있다. 즉 투과에서의 14개의 점 중 통계학적으로 이상점(異常點)은 존재하지 않았다. 투과를 대표하는 14개의 데이터가 거의 일정한 값을 유지한다는 점을 강조해 둔다.

투과 기간에는 식 (3)을 이용해 투과기간의 케이크 비저항  $\alpha_{m,p}$ 를

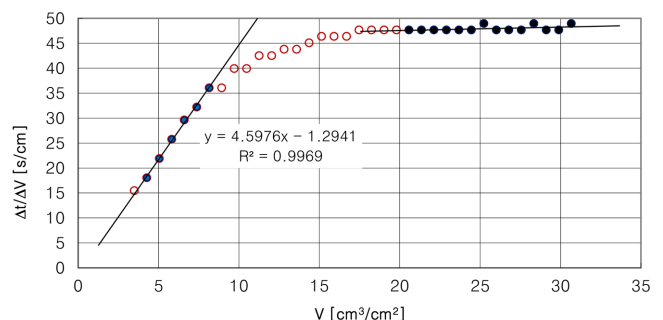


Fig. 1. Filtration-permeation result of 1% CaCO<sub>3</sub> suspension with 3 sheets of Toyo 5A filter at 0.5 atm.

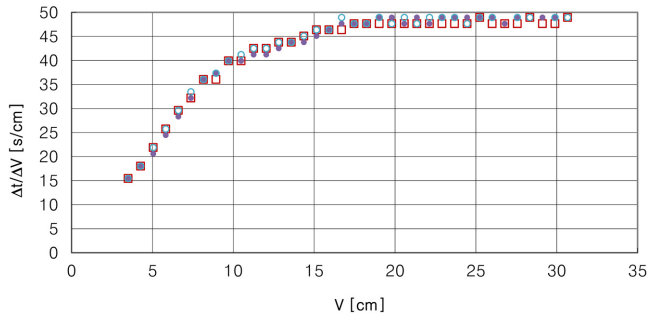


Fig. 2. Results of 3 filtration-permeations performed at the previous conditions.

계산하려면 식 분모에 있는  $R_m$  값을 알아야 한다. 통상적으로 인정되는  $R_m$ 의 값은  $10^8 \sim 10^9 \text{ m}^{-1}$ 이다. 식 (3)에서 분모의 괄호 내의 항은  $(\alpha_{av}W + R_m)$ 이다. 앞의 여과기간의  $\alpha_{av}$  값  $2.52 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 과 여과가 끝나고 투과가 진행될 때의  $W$ 의 값  $1.56 \text{ kg/m}^2$ 을 곱해주면  $\alpha_{av}W$  값이  $3.93 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 임을 알 수 있다. 이 값과  $10^9 \text{ m}^{-1}$ 과 정도인  $R_m$  값을 비교하면 식 (3)에서  $R_m$ 을 생략하여도 큰 오차가 없는 것을 알 수 있다. 이 방법으로 구한 투과 기간의 케이크 평균 비저항값  $\alpha_{av,p}$ 는  $1.70 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 으로 여과기간보다 상당히 작은 값이었다.  $R_m$  값은 이론적으로 항상 양의 값이어야 하므로,  $\alpha_{av,p}$ 가  $\alpha_{av,f}$ 보다 작은 원인인  $R_m$ 의 생략에 의한 것은 아니다.

#### 4-1-2. 동일한 조건에서 세 번 실험한 결과

Fig. 2에 앞 결과 동일한 조건에서 세 번 실험한 결과를 나타냈다.

세 번의 실험 결과를 검은 원, 흰 원, 그리고 네모로 나타냈다. 세 결과는 여과가 시작되는 첫 점부터, 투과가 계속 진행되는 실험 종료까지 모든 영역에서 거의 일치하는 것으로 보인다. 그러나 앞으로 제시하는 모든 실험이 이와 같이 일치한 것은 아니다. 실험 미숙에 근거하지 않은 오차가 발생하는 경우도 많이 있다.

Fig. 2의 세 번의 실험 결과를 살펴보면, Ruth가 언급했던 투과 기간의 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,p}$ 의 지속적인 증가[4]가 나타나지 않는다. 이 연구에서 실험한 8종류의 여과매체 중 앞으로 언급할 2종류의 여과매체에서만 이런 현상을 보인 경우가 있었다. 이 경우에서도 3번이나 5번 실험했을 때 모두  $\alpha_{av,p}$ 의 지속적인 증가가 나타났던 것은 아니다. 또한 과거 저자의 보고[5,7], Tiller 등의 보고[6]에서도 이와 같은 현상이 나타나지는 않았다. 결과적으로 여과-투과 실험의 투과에 의한 케이크 평균 비저항을 사용할 수 없는 가장 큰 장애가 제거되었다고 볼 수 있다.

Fig. 2의 결과로 여과기간을 분석한 항목을 Table 1에 나타냈다.

이 표에 보이는 세 개의  $\alpha_{av,f}$ 의 평균은  $2.66 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 이고, 표준편차는  $0.121 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 이므로 변동계수(coefficient of variation, COV)는 0.0454이다. 아주 잘 일치하는  $\alpha_{av,f}$ 가 두 개가 있으나, 나머지 한 개로 인해 변동계수가 그다지 작지는 않다. Table 1에서 여과기간의 직선에서의 결정계수  $R^2$ 이 처음과 두 번째 실험에서는 1.000000이었고, 세 번째 실험도 0.996892였으므로 직선성이 보장되고 있음에도 데이터 세 개가 모두 일치하지는 않았다.

Table 1. Filtration results from Fig. 2

$\alpha_{av,f}$	$R_m$	No. of data	Coeff. a	Coeff. b	$R^2$	Std. Error
2.73E+11	-2.50E+10	5	4.977	-4.508	1.000000	2.160E-14
2.73E+11	-1.79E+10	5	4.977	-3.220	1.000000	1.877E-14
2.52E+11	-7.18E+09	6	4.598	-1.294	0.996892	4.169E-01

Table 1의 두 번째 항목은 5번째 항인 절편(Coeff. b)의 값으로 앞의 2-2절에서 설명한 방법으로 계산한 여과매체의 저항  $R_m$ 이다. 이 실험에서는 세 번 모두 절편이 음의 값을 가지고 있으므로  $R_m$ 도 음의 값으로 계산된다. 이론적으로는 여과매체가 존재하는 한 저항  $R_m$ 이 음의 값이 될 수는 없다. 실제 여과실험에서 이런 현상이 자주 관측되는 것은 여과 초기에 작은 입자가 여과매체의 큰 세공을 빠져나감으로 저항이 작게 측정되었거나, 침전의 영향으로 인하여 직선의 기울기가 바뀌었을 가능성의 두 가지로 해석할 수 있다[12]. 두 가지 중 어떤 것이 진실인가를 이 결과로 알 수는 없으나, 현재의 방법으로 여과매체의 저항  $R_m$ 을 계산하도록 하는 교재 내용[9]은 의미가 없을 수 있음을 실험적으로 입증해주는 결과라고 볼 수 있다.

세 번째 항목인 여과기간 채용된 데이터의 개수는 논란의 여지가 많다. 본 연구에서 확실한 직선의 정의를 하려 시도하였으나 초기의 한 데이터의 채택 여부, 여과에서 투과로 바뀌는 과정에서의 어떤 기준으로 여과 데이터를 선택해야 하는가에 대한 규정을 마련하는 것이 어려웠다. 여기에 채택된 5개와 6개의 데이터는 앞 절에서 언급한 회기분석을 바탕으로 그래프의 모양을 관찰하며 임의로 선택한 것이다. 여과실험에서 가장 큰 문제점 중의 하나라고 생각한다.

Fig. 2에 의한 투과 결과를 Table 2에 나타내었다.

하나의 실험 내에서도 투과기간의  $\Delta t/\Delta V$  값 또한 미세하게 변화하므로 투과기간의 14개 데이터의 평균값을  $\text{Avg.}(\Delta t/\Delta V)$ 에 나타내었다. 표준편차(St. Dev.)열은 한 실험 내의 투과기간의 14개 투과 데이터의 표준편차를 나타내며, COV는 한 실험에서의 변동계수이다. 한 실험 내에서의 투과 데이터의 변동계수는 가장 큰 값이 0.0162로 상당히 좋은 값이다.

Fig. 2의 결과로 계산한 Table 2의 세  $\alpha_{av,p}$ 의 평균값은  $1.73 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 이고, 표준편차는  $0.0199 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 이므로 변동계수는 0.0115이다. 앞의  $\alpha_{av,f}$  경우보다 표준편차가 작고, 변동계수도 작아 실험 값으로서 더 믿을 수 있다.  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 의 값이 일치하지 않는 현상에 대하여는 곧 분석할 것이다.

#### 4-2. 여과투과 실험 결과에 의한 Ruth 공식의 검토와 여과기간 발생하는 침전의 영향

먼저 Fig. 1과 2에 나타난 투과 실험 결과로 식 (3)을 분석한다. Fig. 1과 2에서 투과가 진행되고 있을 때에는  $\Delta t/\Delta V$ 의 값에 변화가 없다. 이는 수식 (3)의 좌변을 구성하고 있는  $\Delta V/\Delta t$  값이 계속 일정하다는 의미이고, 또한 식의 우변을 구성하고 있는 투과압력  $\Delta p$ , 투과하는 액의 점도  $\mu$ , 여과매체 단위면적당 케이크의 고체질량  $W$ , 그리고 여과매체의 저항  $R_m$  또한 투과기간에 일정하다는 의미이다. 물론 이 중 어느 하나가 변화하는 것을 다른 하나가 정확히 같은 정도

Table 2. Permeation results from Fig. 2

$\alpha_{av,p}$ (m/kg)	No. of data	Avg. ( $\Delta t/\Delta V$ )	St. Dev.	COV
1.74E+11	14	48.852 s/cm	0.793 s/cm	0.0162
1.74E+11	14	48.944 s/cm	0.714 s/cm	0.0145
1.70E+11	14	47.932 s/cm	0.548 s/cm	0.0114



로 변화하여 총량이 일정한 경우를 상정할 수 없는 것은 아니다. 투과가 일어나는 시기로 보아  $W$ 가 일정하게 유지되는 것은 분명하므로, 이런 가능성이 있는 경우는  $\Delta p$ 와  $\alpha_{av}$ 가 투과기간에 같은 정도로 변화할 때뿐이다. 그러나 우리가  $\Delta p$ 를 일정하게 유지해주고 있으므로 이것은 불가능한 가정이다.

식 (2)와 여과기간의 데이터를 분석하는 것은 조금 어렵다. 여과 초기를 제외하면 위의 투과에서 분석한 결과를 원용할 수 있다. 점도  $\mu$ 는 여과기간이나 투과기간에 일정한 값을 가진다고 생각할 수 있다. 여과압력  $\Delta p$ 도 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.  $R_m$ 과 케이크의 고체 분율  $S_c$ 도 초기를 제외하고는 같은 값이라고 생각할 수 있다[11].

Ruth[3,4,8], Tiller[10]는 물론 지금까지의 모든 학자들은 케이크에 공급되는 현탁액의 고체분율  $S$ 가 일정하다고 가정했다. 그러나 우리는 여과기간에 침전이 발생하는 것을 눈으로 확인할 수 있으며, 여과 셀의 상부에 맑은 상등액이 존재하는 것을 볼 수 있다. 맑은 상등액에 들어 있던 고체물질이 갈 수 있는 곳은 아래의 현탁액의 수밖에 없다. 그러므로 맑은 상등액이 있다는 것은 침전으로 인해 케이크에 더 큰 값의  $S$ 가 공급된다는 실제적인 증거가 될 수 있다. 즉, 케이크에 공급되는 현탁액의 고체분율  $S$ 가 여과가 시작되는 때의 값과 같으리라고는 생각할 수 없다.

식 (2)에서  $\frac{\mu}{\Delta p} \left( \frac{\rho S}{1-S} \right) \alpha_{av}$ 가 일정해야 여과기간의 데이터가 직선을 이룬다. Fig. 1과 2의 실험 결과에서 여과에 해당하는 부분이 직선을 이루는 것을 볼 수 있다. 이 직선은 이 기간에  $S$  값이 일정하였다는 것을 의미한다. 단, 이  $S$ 는, 앞에서 설명한 바에 의하면, 현탁액을 여과 셀에 넣어 줄 때의 값은 아니다. 그럼에도 불구하고 우리는 초기 현탁액의 고체 분율과 기울기를 사용하여  $\alpha_{av,f}$ 를 계산하였다. 이로 인한 오차가 Table 1의  $\alpha_{av,f}$ 에 포함되어 있다고 생각한다.

실험에서 200 cm<sup>3</sup>의 현탁액을 사용했다. 이는 V로 환산하면 15.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 이 되지만, Fig. 1과 2에서는 이보다 훨씬 이전인 8.2 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 정도부터 직선이 사라지고 곡선이 나타난다. 여과를 나타내는 직선 기간이 거의 반 가까이 줄어들기 때문에 여과기간에 속하는 데이터를 확정하기가 어려워진다.

두 개의 직선으로 이루어지는 여과와 투과를 이어주는 곡선이 Fig. 2에서는 거의 일정한 모양으로 보여지나, 다른 실험에서는 상당히 다양하다. 즉, 동일한 조건에서의 실험에서도 여과가 조금 더 연장되는 경우가 있고, 또는 조금 더 일찍 종료되는 경우가 있다. 이는 여과 대상 현탁액을 여과 셀에 넣은 후 여과를 시작하는 시간에 1~2초의 차이가 존재하여 침전의 시작과 여과 시작이 일치하지 않는 것, 또는 여과 셀에 넣은 때 현탁액을 따르는 속도로 인해 발생하는 외류의 강한 정도의 차이가 침전 시작 시간을 몇 초 늦추거나 빠르게 하는 것 등의 조절하기 어려운 요소들로 인한 것일 수 있다.

#### 4-3. 여과매체에 따른 여과-투과 결과 비교: 0.5기압, 1장의 여과매체

압력 0.5 기압에서 여과-투과 실험을 8종류의 여과매체 각각 한 장을 사용하여 각각 3~5번 씩 실험한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

순서는 섬유 기반의 여과매체이며 세공 크기가 비교적 큰 Toyo 5A(5A로 표시), 커피 필터(CF), Whatman No. 4(W4)를 앞쪽에 두었으며,  $\alpha_{av,f}$ 를 나타내는 표식의 설명은 5A\_F, CF\_F, W4\_F로 하였고,  $\alpha_{av,p}$ 를 표현하는 표식의 설명에는 permeation의 약자인 P를 첨가하여 5A\_P, CF\_P, W4\_P로 나타내었다. 이 세 가지 여과매체는 세공

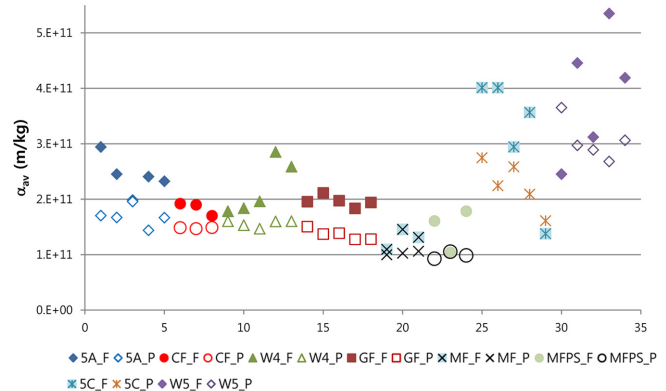


Fig. 3.  $\alpha_{av,f}$  and  $\alpha_{av,p}$  by filtration-permeation performed with 8 kind of filter media (1 wt% CaCO<sub>3</sub>, 0.5 atm, one sheet of filter medium).

의 상당직경이 각각 4.8, 6.1, 6.2  $\mu$ m로 고려 대상인 8 종류의 여과매체 중 가장 큰 세공을 가진 매체들이다.

유리 섬유로 구성된 Whatman GF/C는 GF(cellulose) membrane filter는 MF, polysulfon membrane filter는 MFPS로 표현하였다. 각각의 세공 상당직경은 3.94, 0.39, 0.86  $\mu$ m이다. 마지막에 놓은 Toyo 5C와 Whatman No. 5는 각각 5C, W5로 표시하였으며 상당직경은 각각 2.43와 1.83  $\mu$ m이다. 각 여과매체의 이름이 너무 길어 앞으로는 위에서 정의한 바와 같이 표시하기로 한다.

여과매체가 케이크 평균 비저항값에 영향을 주지 않는다는 여과의 기본 이론[4,10]에 의하면 적어도 Fig. 3의 여과 기간에 측정된 34개의  $\alpha_{av,f}$ 는 실험오차 이내의 값을 가져야 한다. 이에 대해 여과매체를 다음의 4종류로 나누어 살펴본다.

##### 4-3-1. 섬유기반이고 세공 크기가 큰 여과매체: Toyo 5A, coffee filter, Whatman No. 4

실험실 케이크 여과에 많이 사용되는 여과매체 5A, CF, W4에서 수행한 Fig. 3 앞부분 위쪽 13번 실험의  $\alpha_{av,f}$  평균은  $2.20 \times 10^{11}$  m/kg, 표준편차는  $4.15 \times 10^{10}$  m/kg으로 변동계수는 0.189이다. 변동계수가 0.1이 넘으므로 이 데이터들은 분산이 심하여 여과지 간에 동일성이 없다고 판단할 수 있다. 다른 통계적 분석방법도 있으나 간단한 방법을 택하였다.

이 세 가지 여과매체의 실험에 의한 투과기간에 구한  $\alpha_{av,p}$  13개의 평균은  $1.59 \times 10^{11}$  m/kg, 표준편차는  $1.41 \times 10^{10}$  m/kg으로 변동계수는 0.0886이다. 아주 좋은 결과는 아니나, 세 여과지에 어느 정도의 동일성이 있다고 볼 수 있다. 더 자세한 분석은 같은 조건에서 여과매체 3장으로 실험한 결과, 그리고 0.2기압의 결과까지 고려하여 검토할 것이다.

##### 4-3-2. 유리섬유로 구성된 여과매체 : Whatman GF/C

유리섬유로 구성된 여과매체 GF로 실험한 5개의 데이터는  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 의 차이가 있는 것을 제외한다면 흠여짐이 거의 없는 결과였다. 각각의 변동계수는 0.0220과 0.0386이었다. 현 실험에서의 변동계수 값은 나쁘지 않으나, 이 유리섬유 여과매체에 대하여는 앞으로 설명할 다른 이유로 인하여 여과 분석에서 제외하였다.

##### 4-3-3. Micro-filtration을 위한 membrane filter : Cellulose and Polysulfon membrane filter

교차여과에 사용되는 membrane filter 두 가지 종류를 사용하여 여과-투과 실험을 수행하였다.

두 여과매체에 의한  $\alpha_{av,f}$ 의 변동계수는 언급 순서대로 각각 0.141과 0.265로 사용하기 어려울 정도의 값을 가졌다. 여과매체가 여과의 것과 달리 두꺼워서 실험에 어려움을 겪은 때문인지, 여과매체 자체의 특성인지는 여과결과만으로는 알기 어렵다.

그러나 투과 결과에서 구한  $\alpha_{av,p}$  6개가 거의 일치하는 것으로 보아 실험의 문제는 아닌 것으로 판단된다.  $\alpha_{av,p}$ 의 변동계수는 각각 0.0313과 0.0463이다.

이 여과매체들 MF와 PSMF는 세공이 0.39와 0.86  $\mu\text{m}$ 로 다른 여과매체에 비해 작으므로, 2-2절에서 제시한 식 (2)와 절편의 값으로 계산한 여과매체의 저항  $R_m$ 이 다른 것보다 커야 한다고 생각하는 것이 옳다. 또한 식 (3)을 사용할 때  $R_m$  값을 생각하고 계산했으므로 투과에서의  $\alpha_{av,p}$  값은 다른 매체에 비해 커져야 정상이다. 그러나 Fig. 3에서  $\times$ 와  $\circ$ 로 표시한 두 여과매체의  $\alpha_{av,p}$ 는 다른 경우에 비하여 눈에 띄 정도로 작은 값이다. 이에 대해 우리는 다음과 같은 설명을 제안한다. 여과매체의 세공 직경이 작으면 작은 입자들이 여과매체의 세공을 막는 현상이 거의 일어나지 않아 전체적인 저항이 작아진 것으로 나타날 가능성이 있다. 이 문제는 앞으로 더 연구해야 할 과제이다.

이 MF와 PSMF는 2 장이나, 3 장의 여과매체를 겹쳐 실험할 수 없으므로 이 논문의 중요한 주제 중의 하나인 3장의 실험 결과를 얻을 수 없어 전체적인 분석에는 사용할 수 없었다.

4-3-4. 매우 큰  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 를 나타내는 여과매체; Toyo 5C, Whatman No. 5

앞에서 언급한 바와 같이, 사용된 탄산칼슘은 부피로 보아 10%가 1  $\mu\text{m}$  이하의 크기였으며 0.3  $\mu\text{m}$ 의 입자도 존재했다. 그럼에도 불구하고 앞서 Fig. 3에서 본 바와 같이 세공직경 3.9~6.2  $\mu\text{m}$ 인 5A, CF, W4, GS 등의 여과매체와 세공직경 0.39~0.86  $\mu\text{m}$ 인 MF와 PSMF 여과매체를 사용한 실험 모두에서 거의 동일하다고 할 수 있는  $\alpha_{av,p}$ 를 나타내었다. 단,  $\alpha_{av,f}$ 가 어느 정도의 분산을 보인 것이 사실이다. 그러나 이  $\alpha_{av,f}$ 도 지금 언급하려 하는 세공 크기 2.4와 1.8  $\mu\text{m}$ 인 5C와 W5의 보다는 분산이 덜함은 Fig. 3에서 볼 수 있다.

이론적으로는 모든 여과매체에서 동일한  $\alpha_{av}$ 가 측정되어야 하나, 지금 언급하는 여과매체들과 같이 특이한 값을 나타내는 경우도 많이 있다. Fig. 3에 나타난 5C 다섯 개의  $\alpha_{av,f}$  평균은  $3.18 \times 10^{11}$  m/kg, 표준편차는  $1.10 \times 10^{11}$  m/kg이므로 변동계수 0.346이고,  $\alpha_{av,p}$ 의 평균은  $2.25 \times 10^{11}$  m/kg, 표준편차는  $4.45 \times 10^{10}$  m/kg이어서 변동계수는 0.198이다. 앞서의 모든 실험결과와 비교할 때 평균, 표준편차, 변동계수 모두가 크게 다르며, 투과에서 구한 값조차 변동계수가 0.1을 훨씬 넘는다. 그러므로 실험값으로서의 가치가 없다고 판단한다. Fig. 3의 오른쪽 끝에 나타난 W5는 이보다 더 큰  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$  평균값을 가지고, 분포가 더 큰 경우도 있으므로 이 또한 앞으로의 모든 분석에서 제외하였다.

두 여과매체 5C와 W5는 재질이 섬유기반으로 5A, W4와 동일하나 두 군(群)은 대단히 큰 차이의 여과-투과 결과를 보인다. 오히려 GF는 유리섬유, MFPS는 고분자 물질로 재질이 다름에도 불구하고 이 5C와 W5보다 5A, W4에 가까운 결과를 나타내었다.

5C와 W5는 공극 직경에 있어서 4-3-1에 언급한 여과매체보다 작고, 4-3-3의 membrane filter 보다 큰 1  $\mu\text{m}$  정도였으면서 독특한 여과-투과 결과를 보였다. 이는 입자 부피의 10% 정도에 속하는 1  $\mu\text{m}$  이하의 입자들이 여과가 진행되는 동안에 여과매체의 공극을 상당한 정도 막았다고 해석할 수밖에 없다. 세공이 크거나, 작은 여과매체에

는 입자에 의한 막힘현상이 측정되지 않으면서, 중간 크기의 세공이 막히는 것은 모순처럼 생각된다. 그러나 입자와 여과매체 공극 크기의 상대적인 비율에 의해 여과매체의 막힘 현상이 달라지는 것은 충분히 가능하다. 이 문제는 이론화나 이론을 입증하기 위한 새로운 방법의 실험을 창안하는 것이 매우 어려운 분야이므로 더 이상의 분석은 후일의 연구에 맡기려 한다.

이론화는 어렵지만, 실험결과에 의거하여 한 현탁액의 케이크 여과에 부적합한 여과매체가 존재한다는 결론을 내릴 수 있으며 이 실험에 사용된 탄산칼슘에 대해서는 5C와 W5가 부적합 한 여과매체라는 결론은 내릴 수 있다. 그러므로 앞으로의 분석에서 5C와 W5의 실험 결과를 제외할 것이다.

#### 4-4. 여과매체 3장과 1장을 사용한 실험 결과에 대한 분석

4-4-1. 압력 0.5 기압에서 여과매체 1장과 3장 실험에 대한  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 의 통계적 분석

앞의 4-3절 분석에 의해 제외되지 않은, 즉 케이크 여과에 적합한 여과매체 5C, CF, W4에 대해 한 장의 여과매체와 3장의 여과매체를 사용하여 0.5기압에서 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4의 내부에 있는 세로선을 기준으로 왼쪽은 Fig. 3의 일부인 여과매체 한 장을 사용한  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 이고, 오른쪽은 3장의 여과매체를 사용한  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 이다. 가로축의 제목 자리에 있는 설명은 한 장과 3장의 실험 개수 차이로 인하여 후반으로 갈수록 약간 왼쪽으로 치우쳐 있다. 이 설명에서 5A1\_F는 5A매체 한 장을 사용하여 실험한 여과기간의 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,f}$ 이고, 5A3\_F는 3장을 사용하여 실험한  $\alpha_{av,f}$ 이다. 다른 데이터도 이와 같은 방법으로 표시하였다.

여과이론[4,10]에 의하면 석 장을 사용한 경우가 여과매체의 저항이 두 장만큼 더 커져야 한다. 단, 입자에 의해 막히지 않은 경우의 여과매체는 앞에서 언급한 바와 같이 저항  $R_m$ 이  $10^9 \text{ m}^{-1} \sim 10^{10} \text{ m}^{-1}$  정도이므로 실험에서 판별하기 어렵다.

Fig. 4의 세 종류의 여과매체 5A, CF, W4에 의해 측정된  $\alpha_{av}$ ,  $\alpha_{av,f}$ 에 대한 통계적 분석을 다음의 순서로 수행했다.

(1) 여과 데이터  $\alpha_{av,f}$ 가 여과매체 1장의 경우와 3장의 경우가 차이가 있는지의 여부를 알기 위해 일원배치법에 의한 분산분석을 시행하였다. 전체 데이터를 1장의 경우 13개와 3장의 경우 9개의 두 부류로 나누어 시행한 결과, 유의확률 P값이 0.288로 유의하지 않다는 결과를 얻었다. 이는 1 장의 여과와 3장의 여과 결과가 95%의 유의확률로 “구분되지 않는다”는 귀무가설이 기각되지 않는다는 의미이다. 즉, 1 장과 3장의 여과결과는 구분되지 않고 동일하게 취급할 수

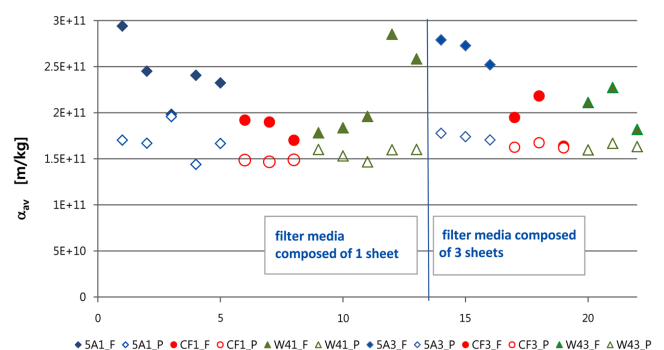


Fig. 4. Comparison of filter media composed of 1 sheet and 3 sheets at 0.5 atm.

있다. F비는 1.19로 F 기각치 4.35보다 작아 동일한 결론이 나온다.

(2) 투과 데이터  $\alpha_{av,f}$ 에 대해서도 여과매체 1장의 경우와 3장의 경우에 두 부류에 대해 일원배치법을 시행한 결과 P 값은 0.112로 얻었다. 이것도 95%의 유의확률로 1장 투과와 3장의 투과 결과가 동일하게 취급될 수 있다는 결과이다. F 비는 2.76으로 F 기각치 4.35보다 작아 같은 결론이 된다.

이상의 분석 결과는 여과매체 1장을 사용했을 경우와 3장을 사용했을 때, 여과와 투과에서 실험오차 이내로 취급될 정도의 분포만 있다는 것을 확인해 주었다.

(3) 앞의 (1)과 (2)의 결과를 근거로 Fig. 4의 결과를 여과 전체 22개의와 투과 전체 22개의 데이터 두 부류로 나누어 일원배치법에 의한 분산분석을 수행하였다. P 값은  $4.99 \times 10^{-8}$ 으로 앞서의 두 경우와는 달리 대단히 유의하다. 이는 앞의 두 경우와 달리 두 부류의 데이터가 구분된다는 의미이다. 또한 분석 결과인 F비는 43.9로 F기각치 4.07보다 매우 커서 같은 결과를 준다.

이상의 내용을 정리하면 다음과 같다. 0.5 기압에서 5A, CF, W4 세 종류의 여과매체를 사용하여 측정한 모든  $\alpha_{av,f}$ 는, 여과매체 1장을 사용했을 때와 3장을 사용했을 때 95%의 유의수준에서 구별되지 않는다. 투과 결과  $\alpha_{av,p}$ 에 대해서도 1장을 사용했을 때와 3장을 사용한 경우 구별되지 않는다. 이 결론은 일정 압력에서 케이크 평균 비저항이 원칙적으로는 여과매체의 특성과 관계없이 일정한 값을 가진다는 과거의 학설[3,4,8,10]이 옳다는 것을 증명해주는 결과이다.

그러나 0.5 기압 실험의 경우 여과에서 구한  $\alpha_{av,f}$ 와 투과에서 구한  $\alpha_{av,p}$ 는 분명히 구분된다.

4-4-2. 압력 0.2 기압에서 여과매체 1장과 3장 실험에 대한  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 의 통계적 분석

0.2 기압에서의 5A, CF, W4에 의한 실험결과를 Fig. 5에 나타내었다.

무엇보다도 먼저, 여과에 비해 투과 결과가 거의 일정한  $\alpha_{av,p}$ 를 가지고 있다는 것이 확연히 보인다.

앞 4-4-1절의 경우와 같은 분석을 0.2 기압의 경우에 대해서도 동

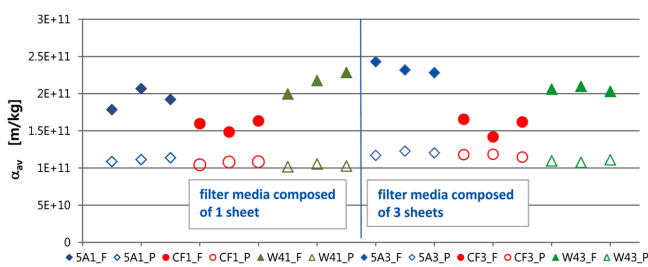


Fig. 5. Comparison of filter media composed of 1 sheet and 3 sheets at 0.2 atm.

일한 순서로 시행하였다.

(1) 여과매체 1장과 3장의 경우에 대해 여과 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,f}$ 로 일원배치법에 의한 분산분석을 시행하였다. 각각 9개의 데이터를 분석한 결과 P 값이 0.478로 대단히 유의하지 않았다. 이는 95%의 유의수준으로 1 장의 여과와 3장의 여과 결과가 구분되지 않고 동일하게 취급할 수 있다는 의미이다. F 비는 0.527로 F 기각치 4.49보다 작아 같은 결론을 준다.

(2) 투과 데이터  $\alpha_{av,p}$ 에 대해서도 1장의 경우와 3장의 경우의 각 9개 데이터로 일원배치법을 시행한 결과 P 값 0.397을 얻었다. 이것도 95%의 유의확률로 1장 투과와 3장의 투과 데이터가 동일하게 취급된다는 결과이다. F 비는 0.746으로 F 기각치 4.30보다 작아 같은 결론이 된다.

위의 두 분석 결과는 여과매체 1장을 사용했을 경우와 3장을 사용했을 때, 여과와 투과에서 실험오차 이내로 취급될 정도의 분포만이 존재한다는 것을 확인해 주었다.

(3) 앞에서 이끌어 낸 (1)과 (2)의 결과를 근거로 Fig. 5의 전체 결과를 여과와 투과 데이터 두 부류로 나누어 각각 18개 씩의 데이터로 일원배치법에 의한 분산분석을 수행하였다. P 값은  $8.73 \times 10^{-13}$ 으로 매우 유의하다. 이는 두 종류의 데이터가 매우 잘 구분된다는 의미이며, 분석 결과인 F 비도 122로 F 기각치 4.13보다 매우 커서 잘 구분된다는 것을 보여준다.

모든 내용을 정리하면 0.2 기압에서도 역시 한 장, 또는 3장의 여과매체를 사용한 여과와 투과의 결과는 구분되며, 여과 혹은 투과 각각의 범주에 속하는 데이터는 동일하게 취급할 수 있다고 결론지을 수 있다.

앞서와 마찬가지로 적절한 여과-투과에서는 여과매체의 숫자에 따라 케이크 평균 비저항이 다르게 측정되지 않는다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 여과와 투과 결과는 구분된다.

4-4-1절과 4-4-2절의 분석으로 보아 0.2 기압과 0.5 기압의 여과투과 실험에서 전체적인 경향은 일치하였다.

#### 4-5. 여과실험 값과 투과실험값의 분포 정도 비교

현재 고려대상인 세 종류의 여과매체에 대한 여러 실험의 결과 구하게 된  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 의 평균값, 표준편차, 그리고 변동계수를 Table 3에 나타내었다.

표 상반부의 굵은 선 안에는 여과매체 1장과 3장의 결과를 분리하여 계산한 평균, 표준편차, 변동계수를 보였으며, 하반부에는 1장과 3장의 결과를 모두 모아 계산한 값을 적었다. 전반적으로 보아 앞 절의 결론과 같이 1장과 3장의 차이는 크지 않다.

압력 0.5 기압, 여과매체 1장과 3장으로 실험한 22개의 여과기간의 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,f}$  모두의 평균값은  $2.21 \times 10^{11}$  m/kg이고,

Table 3. Average, standard deviation and COV for various filtration-permeation conditions

	0.5 atm				0.2 atm			
	$\alpha_{av,f}$ [m/kg]		$\alpha_{av,p}$ [m/kg]		$\alpha_{av,f}$ [m/kg]		$\alpha_{av,p}$ [m/kg]	
	1 sheet	3 sheets	1 sheet	3 sheets	1 sheet	3 sheets	1 sheet	3 sheets
Average	2.20E+11	2.22E+11	1.59E+11	1.67E+11	1.88E+11	2.02E+11	1.07E+11	1.10E+11
St. Dev.	4.15E+10	3.98E+10	1.41E+10	6.01E+09	2.75E+10	3.50E+10	3.99E+09	5.14E+09
COV	1.89E-01	1.79E-01	8.86E-02	3.60E-02	1.46E-01	1.73E-01	3.73E-02	4.68E-02
Average	2.21E+11		1.62E+11		1.94E+11		1.11E+11	
St. Dev.	3.99E+10		1.20E+10		3.10E+10		6.20E+09	
COV	1.80E-01		7.39E-02		1.60E-01		5.57E-02	



표준편차는  $3.99 \times 10^{10}$  m/kg 으로 변동계수는 0.180이다. 이 변동계수는 이 값들이 데이터로서의 의미가 없다는 것을 말해준다. 즉 서로 성질이 매우 유사한 여과매체를 사용하여 여과실험으로 측정된  $\alpha_{av,f}$ 는 서로 연관하여 사용하기 어렵다는 것을 알려준다. 그 위쪽에 보인 1장과 3장을 따로 계산한 변동계수도 각각 0.189와 1.79로 전체를 계산한 것과 같이 0.1을 넘으므로 동일한 결론을 내릴 수 있다.

동일 압력 0.5 기압에서 여과매체 1장과 3장으로 실험한 투과 데이터 값 22개 모두의  $\alpha_{av,p}$ 의 평균값은  $1.62 \times 10^{11}$  m/kg이고, 표준편차는  $1.20 \times 10^{10}$  m/kg으로 변동계수는 0.0739이다. 만족스럽지는 않으나 어느 한 매체에서 측정된  $\alpha_{av,p}$  값은 성질이 유사한 다른 여과매체로 측정된 값과 같은 척도로 사용할 수도 있다는 결론을 얻는다.

같은 Table 3의 압력 0.2 기압에서 여과매체 1장과 3장을 구분하여 정리한 결과에서, 여과의 경우가 투과의 경우보다 표준편차는 거의 7 배 가량, 변동계수는 거의 3배 가량 크다. 여과매체 1장과 3장을 합쳐하여 계산한 표준편차는 여과의 경우  $3.10 \times 10^{10}$  m/kg, 투과의 경우  $6.20 \times 10^9$  m/kg으로 여과가 커며 변동계수 역시 여과의 경우 0.160, 투과의 경우 0.057로 앞서 0.5 기압과 동일한 결론을 내릴 수 있다.

위의 모든 결과에서 여과실험보다 투과결과를 사용하여  $\alpha_{av}$ 를 측정하는 것이 더 믿을만한 실험결과를 얻을 수 있다는 결론을 도출할 수 있다.

마지막으로 남은 문제는  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$  중 어느 것이 더 정확한가이다. 저자는 여과기간에 침전이 없는 여과실험을 시행하여, 침전이 없는 경우에는  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 가 일치한다는 것을 증명하였다[12]. 이 주제는 다른 실험방법이 필요하므로 본 연구에서는 더 이상 논의하지 않으려 한다. 단, 여과기간의 데이터에는 앞에서 언급한 침전현상이 포함되어 있음에도 불구하고 계산에 반영되지 않았으므로  $\alpha_{av,f}$ 와  $\alpha_{av,p}$ 가 차이가 날 수밖에 없다고 결론을 내릴 수는 있다.

#### 4-6. 압력 0.5 기압과, 0.2 기압 여과투과에서 케이크 평균 비저항의 변별 가능성 분석

4-6-1. 여과매체 1 장을 사용한 0.5 기압과 0.2 기압에서 여과-투과 실험 결과 분석

Fig. 6에 여과매체 한 장으로 실험한 0.5 기압과 0.2 기압의 여과와 투과 실험의 결과를 나타내었다.

그림의 윗쪽에 분포하는 여과 결과  $\alpha_{av,f}$ 를 보면, 압력을 나누는 수직선을 경계로 압력이 높은 왼쪽은 조금 더 큰 값을 가지고 압력이 낮은 오른쪽은 약간 작은 값을 가지는 것처럼 보이기는 하나, 이 데이터들이 압력의 효과를 나타내는가의 여부는 잘 알 수 없다. 그러므로 데이터들로 일원배치법에 의한 95%의 유의수준을 가지는 분산분석을 실시하였다. 계산된 유의확률 P 값이 0.0566이었다. 일반적인 판단으로 P 값이 0.05를 넘으면 유의하지 않다고 결론을 내린다. 그러나 통계학에서는 유의확률이 0.05~0.1 사이의 값을 가질 경우

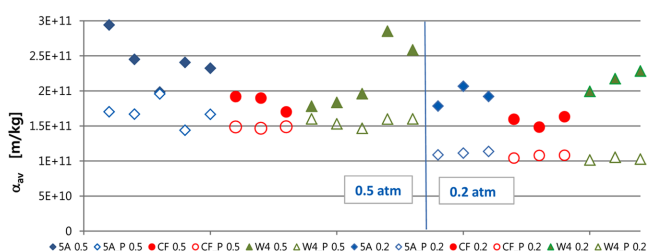


Fig. 6. Pressure effect for 1 sheet of filter medium.

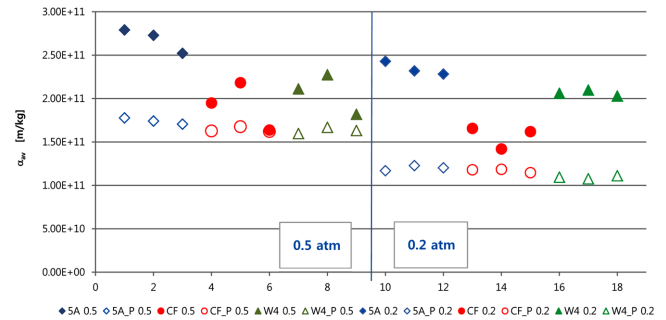


Fig. 7. Pressure effect for 3 sheet of filter medium.

‘미약하게 유의’ 하다고 규정하는 경우도 있다. 우리는 원칙적인 규정을 따라서 여과매체 한 장의 여과 결과에서 0.5 기압의 결과와 0.2 기압 데이터들의 유의확률이 0.0566으로 0.05를 넘으므로 원칙에 따라 유의하지 않고, 즉 서로 구분되지 않는다고 규정한다. 참고를 위해 F 비는 4.09로 계산되었고, F 기각치는 4.35이므로 이것으로도 서로 구분되지 않는다는 것을 기록해 둔다.

즉, 일반적인 여과매체 한 장을 사용한 여과실험에서는 0.5 기압과 0.2 기압의 실험에서 평균비저항값이 판별되지 못한다는 결론을 내렸다.

Fig. 6의 아랫쪽에 분포하는 투과 결과  $\alpha_{av,p}$ 를 보면, 0.5 기압과 0.2 기압이 확연히 나뉘어 지는 것을 알 수 있다. 이를 확인하기 위해 이 투과 데이터들을 사용하여 일원배치법에 의한 95%의 유의수준을 가지는 분산분석을 시행하였다. P 값이  $1.01 \times 10^{-9}$ 으로 여과에 비해 매우 작은 값이며, 이것으로 결과가 매우 유의하다고 확실하게 결론지을 수 있다. 그러므로 투과에서는 압력에 의한 평균 비저항값이 명확하게 구분되었다. 동일 조건에서의 여과 데이터와 비교할 때, 투과로 평균 비저항값을 측정하면 압력에 의한 변화를 명확하게 구분할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. F 값은 114.3으로 F 기각치 4.35보다 매우 커서 두 종류의 데이터는 명확히 구분된다.

4-6-2. 여과매체 3 장을 사용한 0.5 기압과 0.2 기압에서 여과-투과 실험 결과 분석

Fig. 7에 여과매체 3 장으로 실험한 0.5 기압과 0.2 기압의 여과와 투과 실험 결과를 나타내었다.

먼저 0.5기압의 여과 데이터 9개와 0.2 기압의 여과 데이터 9개를 사용하여 유의수준 0.95로 일원배치법을 시행하였다. 결과인 유의확률 P값은 0.204로 유의하지 않다고 확실하게 결론지을 수 있다. 즉, 분산분석에 의하면 3장의 여과에서도 0.5 기압과 0.2 기압의 여과결과가 구분되지 않는다. F 비는 1.75이고 F 기각치는 4.49로 역시 구분되지 않는다. 3장의 여과매체를 사용한 경우에 여과방법으로는 0.5 기압과 0.2 기압의 평균 비저항값이 구분되지 않는다는 결론에 이른다.

각 압력에서 실험한 투과 데이터 9개씩 사용하여 유의수준 0.95로 일원배치법을 시행한 결과 유의확률 P값이  $1.31 \times 10^{-12}$ 으로 매우 유의하다. F 비는 384.1이고 F 기각치는 4.49로 충분히 기각된다. 여과매체 3장을 사용한 투과실험에서 0.5 기압과 0.2 기압의 데이터들은 서로 완전히 구분된다.

결론적으로 여과매체가 1장의 경우와 3장의 경우 모두 여과보다 투과에서 더 정밀한 측정이 가능하다.

#### 4-7. 여과매체 저항 $R_m$ 에 대한 실험적 고찰

Fig. 8에 0.5 기압에서 8종류의 여과매체를 사용하여 여과를 수행

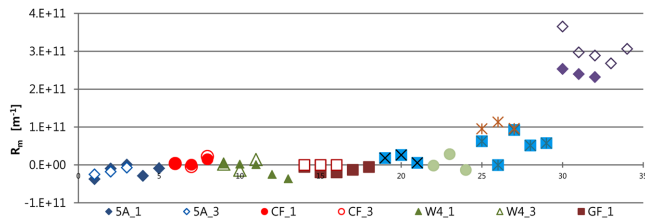


Fig. 8. Filter medium resistance at 0.5 atm, with 1 sheet and 3 sheets.

하고, 각 여과실험에서  $\Delta t/\Delta V$ 와  $V$ 의 그래프를 그린 후 여과기간을 나타내는 직선의 절편 값과 식 (2)를 사용하여 구한 여과매체 저항  $R_m$  값을 나타내었다. 이는 앞서 2-2에서 지정한 바와 같이 오랫동안 여과매체의 저항을 알아내는 표준적인 방법이었다[9].

Fig. 8에서 수평축 설명에 있는 여과매체 약호 뒤의 1은 여과매체 한 장을, 3는 여과매체 석 장을 사용하여 실험한 결과임을 의미한다. 참고로 5A\_1은 동일한 실험을 5번 실행하였고, 5A\_3는 3장으로 세 번 실험한 결과를 그림에 나타낸 것이다.

여과매체 5A, CF, W4의 경우 1 장과 3장의  $R_m$  값의 차이가 다른 여과매체에 비해 거의 없다고 보아도 무방할 정도로 근접해 있다. 단, 5A와 W4의 경우에는 음의 값을 가지는 경우가 상당히 있다는 사실은 특기할 만하다. 앞에서 분석한 바와 같이 여과매체를 입자가 통과해 나가는 경우, 또는 초기가 지난 다음 침전의 영향으로 케이크에 들어가는 현탁액의 고체질량 농도가 더 짙어진 경우에 음의  $R_m$  값이 얻어질 수 있다[12]. 이 경우에는 세 가지 여과매체 중 세공의 지름이 가장 큰 CF에서 음의  $R_m$  값이 얻어지지 않은 것으로 미루어, 두 번째 경우일 가능성이 높다. 이상의 결과로 보아 여과-투과 결과가 좋은 여과매체라고 선정한 5A, CF, W4에서도 여과 실험 결과에서  $R_m$  값을 측정한다는 것은 거의 의미가 없음을 알 수 있다.

여과매체 GF에서 3장의 경우에는 거의 고른  $R_m$  값이 측정되었다. 그러나 이 여과매체는 다음 절에서 언급할 단점이 있으므로 현재 논의에서 제외한다.

Membrane filter에 사용되는 여과매체 MF와 MFPS는 겹쳐놓을 수가 없으므로 한 장으로 실험한 결과만 보였다. MF 여과 결과에서  $R_m$  값은 세 번 모두 양의 값이 관측되었고 이는 전통적인 이론에 부합한다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 MFPS를 사용한 경우에는 세 번 중 두 번이 음의 값의  $R_m$ 이 측정되어 전통적인 이론과 일치하지 않는다.

여과지가 막힌다고 생각되는 5C의 1장 매체 실험에서는 5번의 실험 중 하나를 제외한 나머지 4개의  $R_m$  값이  $5.1 \times 10^{10} \sim 9.6 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  사이에 존재한다. 그리고 3장을 사용한 실험에서는 세 개의 실험값이  $9.5 \times 10^{10} \sim 11.3 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$  사이에 있다. 이 값은 통상적인 케이크의 저항의 1/3 정도에 해당하는 값이다. 동일한 성질의 여과매체 W5의 경우 1장 매체 실험의 5개의  $R_m$  값이  $2.7 \times 10^{11} \sim 3.7 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$  사이에 존재하며, 이 값은 통상적인 케이크 저항보다 상당히 큰 값이다. 여과매체 3장을 사용한 경우에는 오히려 작은  $R_m$  값을 보인다. 여과매체 5C와 W5를 사용하여 여과실험에서 구한  $R_m$  값을 분석하기는 하였으나, 여과기간에 직선을 나타낸 점의 수가 3~4개가 대부분이고 완전한 직선이 아니었으므로 이 직선으로 구한 절편의 값으로  $R_m$ 에 대한 결론을 이끌어내기에는 무리가 있다.

여과압력 0.2 기압에 대한 여과결과로  $R_m$  값을 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. 여과압력 0.5 기압과 큰 차이는 없으나 음의 값의  $R_m$  값이 상당히 나타났다는 것을 다시 강조한다.

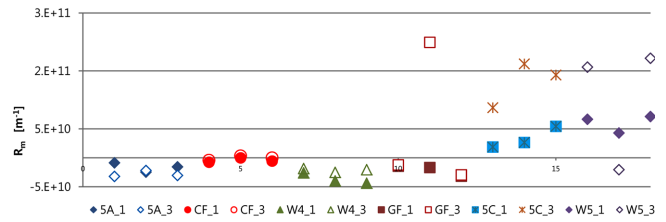


Fig. 9. Filter medium resistance at 0.2 atm, with 1 sheet and 3 sheets.

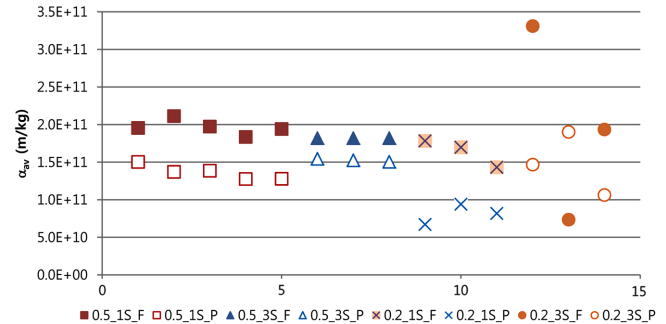


Fig. 10. Filtration and permeation results with Whatman GF/C filter medium.

Fig. 8과 9에 나타난 것으로 보아 식 (3)으로 계산한  $R_m$ 을 침전 등의 영향에 대한 분석에 사용하는 것은 가능하나, 여과진행 중 여과매체의  $R_m$  자체를 측정하는 목적에는 사용되기 어렵다고 생각한다.

#### 4-8. 유리섬유 매체 Whatman GF/C의 여과와 투과 결과 분석

Fig. 10에 GF(Whatman GF/C)를 사용하여 여러 조건의 여과-투과 실험 결과를 나타냈다.

압력 0.5 기압에서 GF 1장을 사용하여 5회씩 실험한  $\alpha_{av,f}$ [0.5\_1S\_F]와  $\alpha_{av,p}$ [0.5\_1S\_P]를 첫 부분에 사각형 표시로 나타내었다. 두 값의 차이는 여과 실험 도중의 침전에 의한 것일 가능성이 크다.

그 다음의 세모로 표시한 6개의 점은 동일한 압력 0.5 기압에서 GF 3장을 사용하여 3회 실험한 결과이다. 여과매체 1장과 3장의 여과기간의 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,f}$  값의 약간의 차이는 실험오차라 생각하였다. 투과기간의 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,p}$ 의 차이는 조금 더 크다. 이를 분석하기 위해서는 다음의 실험에 대한 고찰이 필요하다.

세 번째에 있는 x 표시 6 점은 앞 두 경우보다 낮은 압력인 0.2 기압에서 GF 1장을 사용하여 3회 실험한 여과-투과 결과이다. 기본 이론에 의하면 압력이 낮아졌으므로 케이크 평균 비저항은 모두 작아져야 한다. 그러나  $\alpha_{av,f}$  값 3개 중 하나를 제외한 2개는 크게 달라지지 않았다. 그러나 투과기간의 케이크 평균 비저항  $\alpha_{av,p}$  값은 압력에 의한 값보다 더 큰 폭으로 감소하였다. 이는 압력의 영향이 아니라 낮은 압력에 의해 유리섬유로 구성된 여과매체가 충분히 눌리지 않아 여과매체에 상당한 공간이 있고 그 공간으로 상당량의 고체 입자가 빠져나간 결과일 수 있다고 생각하였다.

그래프의 마지막 부분에 o로 표시한 점들은 낮은 압력인 0.2 기압에서 3장의 여과매체를 사용하여 실험한 결과이다. 이 경우 여과가 표준적으로 잘 이루어지지 않아  $\alpha_{av,f}$  값이 동일 조건의 실험에서 6 배 이상 차이가 난다. 그리고  $\alpha_{av,p}$  값도 상당한 편차를 보인다. 또한 0.2기압 1장의 경우와 비교하면  $\alpha_{av,p}$  값은 모두 증가했다. 이는 첫 장을 빠져나간 고체입자의 상당부분이 두 번째와 세 번째 여과매체

의 유리섬유에 붙어 투과 저항을 증가시킨 결과라고 분석하였다.

동일한 개념으로 앞에서 유보했던 세모 표시에서 3장의 투과 값이 증가한 것이 첫 장에서 빠져나간 입자의 다른 여과매체의 유리섬유에 붙은 것으로 설명할 수 있다. 단, 이 때는 압력이 높으므로 첫 장을 빠져나간 입자의 수가 적어 영향이 크게 나타나지 않은 것으로 생각된다.

이상과 같은 실험결과로 인하여 여과매체 GF를 사용한 모든 데이터는 여과와 투과를 이론적으로 분석하는 데이터에서 제외하였다.

## 5. 결 론

탄산칼슘 1 wt% 현탁액을 사용하여 여과-투과 실험을 8종의 여과매체에 대하여 여과매체 1장과 3장, 압력 0.5 기압과 0.2 기압의 조건에서 실험하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 거의 모든 여과-투과 실험에서 Ruth의 주장과는 달리 투과기간에 거의 변화하지 않는  $\Delta t/\Delta V$  값이 측정되어, 투과 결과로도 안정된 케이크 평균 비저항값을 측정할 수 있음을 입증했다.

(2) 투과기간의 일정하게 유지되는  $\Delta t/\Delta V$  값에 근거하여 Ruth의 식에서 투과기간 동안 압력, 케이크 비저항, 단위면적당 케이크 고체질량 등이 일정하게 유지됨을 논리적으로 입증했다.

(3) 여과매체 8종의 여과-투과 성질을 네 가지 부류로 분류하고 각각 종류의 여과-투과 특성을 분석하였다. 그 결과 여과대상 입자의 크기분포와 여과매체 세공의 직경의 조합에 따라 여과-투과의 결과가 매우 달라지는 경우가 있다는 것을 보이고, 이것을 여과매체의 막힘현상으로 분석하였다. 또한

(4) 여과매체를 1장 사용한 경우와 3장 사용하여 여과-투과 실험을 수행한 결과에 대해 일원배치법에 의한 분산분석을 하였다. 이 결과 여과에서의 케이크 평균 비저항값들이 1장과 3장의 차이가 구분되지 않는다는 결론을 얻었으며, 투과에서의 케이크 평균 비저항값들도 역시 1장과 3장의 차이가 구분되지 않는다는 결론을 얻었다. 각각이 구분되지 않으므로 여과 전체의 케이크 평균 비저항값들과 투과 전체의 평균 비저항값들을 일원배치법으로 분석한 결과 이 둘은 서로 구분된다는 결론을 얻었다. 그러나 이 둘의 분포를 계산한 결과 투과기간의 케이크 평균 비저항값들이 여과기간의 그것에 비해 매우 좁은 분포를 가지는 것이 확인되었다.

(5) Ruth의 수식과 여과기간의  $\frac{\Delta t}{\Delta V}$  vs. V의 그래프의 절편을 사용하여 구한 여과매체 저항  $R_m$ 은 음의 저항이 나오는 경우가 많고 분포도 다양하여 사용하기에는 무리가 있다고 판단하였다.

(6) 유리섬유매체의 여과-투과 실험 결과에 의해 낮은 압력에서 입자의 여과매체 이동 가능성에 대한 분석을 수행하였다.

## 감 사

본 연구는 2011년도 인하대학교 교내연구비로 연구되었으며 지원에 감사드립니다.

## 사용기호

$\Delta p$  : filtration pressure [Pa]

$\Delta p_c$  : pressure drop across cake [Pa]

$R_m$  : resistance of filter medium [ $m^{-1}$ ]

S : mass fraction of solid in suspension [-]

$S_c$  : mass fraction of solid in cake [-]

t : filtration or permeation time [s]

V : volume of filtrate per unit area [ $m^3/m^2$ ]

W : dry cake mass per unit filter area [ $kg/m^2$ ]

## 그리이스 문자

$\alpha_{av}$  : average specific cake resistance [ $m/kg$ ]

$\mu$  : viscosity of filtrate [ $kg/m \cdot s$ ]

$\rho$  : density of filtrate [ $kg/m^3$ ]

## 참고문헌

1. Yim, S. S., Song, Y. M. and Lee, J. Y., "New Expression Theory Based on Darcy's Equation: Unified Theory on Solid-Liquid Separation," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **41**(4), 471-478(2003).
2. Ruth, B. F., Montona, R. E. and Montillon, G. H., "Comments upon Recent Developments in Theory of Filtration," *Ind. Eng. Chem.*, **23**(7), 850(1931).
3. Ruth, B. F., Montillon, G. H. and Montona, R. E., "Studied in Filtration I. Critical Analysis of Filtration Theory," *Ind. Eng. Chem.*, **25**(1), 76-82(1933).
4. Ruth, B. F., "Studies in Filtration IV. Nature of Fluid Flow through Filter Septa and its Importance in the Filtration Equation," *Ind. Eng. Chem.*, **27**(7), 806-816(1935).
5. Yim, S. S. and Ben Aim, R., "Highly Compressible Cake Filtration: Application to the Filtration of Flocculated Particles," *Proceedings, 4th World Filtration Congress, June, Ostend, Belgium*, A1-A7(1986).
6. Tiller, F. M., Hsyung, N. B., Shen Y. L. and Chen, W., "CATSCAN Analysis of Sedimentation and Constant Pressure Filtration," *Proceedings, 5th World Filtration Congress, June, Nice, France*, 80-85(1990).
7. Yim, S. S., "A New Method: Filtration-Permeation for Filtration Theory and Application," *Proceedings, 5th World Filtration Congress, June, Nice, France*, 91-97(1990).
8. Ruth, B. F., "Studies in Filtration III. Derivation of General Filtration Equations," *Ind. Eng. Chem. Chem.*, **27**(6), 708-723(1935).
9. McCabe, W. E., Smith, J. C. and Harriott, P., *Unit Operation of Chemical Engineering*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, NY(1995).
10. Tiller, F. M. and Cooper H. R., "The Role of Porosity in Filtration IV: Constant Pressure Filtration," *AIChE. Journal*, **6**(4), 595-601(1960).
11. Ruth, B. F., Montillon, G. H. and Montona, R. E., "Studies in Filtration II. Fundamental Axiom of Constant Pressure Filtration," *Ind. Eng. Chem.*, **25**(2), 153-161(1933).
12. Yim, S. S. and Song, Y. M., "Study on the Total Analysis of Cake Filtration with Filtration-Permeation Method," *J. KSEE*, **29**(1), 74-81(2007).
13. Yim, S. S., Song, Y. M. and Jun, S. J., "Study on the Measurement of Average Specific Cake Resistance in Cake Filtration of Particulate Suspension and Sedimented Floc," *Korean Chem. Eng. Res. (HWAHAK KONGHAK)*, **40**(3), 330-339(2002).