

## 懸濁液의 濃度에 따른 濾過 平均比抵抗값의 變化

장 재 선  
경기전문대학

# Changes of Average Specific Resistance on Suspension Concentration

Jae-Seon Jang  
Dept. of Health Administration, Kyungki Junior College

### ABSTRACT

This study was carried out to investigate the change of average specific resistance according to suspension concentration for study phenomena occurring during filtration period. As the results of this study, the following conclusions were obtained.

The average specific resistance in 1% CaCO<sub>3</sub> suspension was showed power function(R=0.99), whereas in TOYO 5C and TOYO 5A paper were made little difference under high pressure. It represented from results that filtration theory in concord with cake filtration was no affected the average specific resistance of filter medium in cake filtration. In case of 0.1% CaCO<sub>3</sub> suspension filtration, the TOYO 5C was showed power function, whereas in TOYO 5A paper differently.

In the present study, the P<sub>i</sub> value was calculated from the average specific resistance by filtration method. Therefore, P<sub>i</sub> value were 1.68×10<sup>4</sup>Pa, 4.05×10<sup>3</sup>Pa, and 3.15×10<sup>3</sup>Pa in 5.3×10<sup>4</sup>Pa, 1.3×10<sup>4</sup>Pa, and 8.2×10<sup>3</sup>Pa, respectively. We concluded that propriety of new filtration theory was also proved.

**Keywords :** average specific resistance, suspension concentration, P<sub>i</sub>

## I. 서 론

고액분리에는 상당히 많은 방법이 사용되나 그 중 가장 오래되고 현재도 가장 보편적으로 사용되는 방법은 케이크에 의한 여과이다. 케이크 여과 이론은 Tiller<sup>1)</sup>에 의해 정립되면서 여과기간 중 케이크 내부에서 일어나는 현상에 대한 많은 발전이 이루어졌으나 아직은 전반적으로 이론화가 완비되지 못한 상태이다.<sup>2)</sup>

또한 케이크의 내부현상을 규명하기 위한 compression permeability cell은 Ruth<sup>3)</sup>에 의해 개발된 이후 과거 40년간 케이크 여과를 분석하는 가장 중요한 수단으로 사용되어 왔으나 이 실험은 여과 실험과 직접 결부되지 않아 해석에 어려움이 있으며 또한 실험기간이 오래 걸리고 숙련된 실험자가 아니면 결과에 재현성이 적어 여과가 진행되는 동안 케이크 내부에서 일어나는 현상을 직접 설명하지 못하였다. 그

리하여 이 단점을 보완하기 위하여 Yim은 여과-투과 방법을 제안하여 flocc여과와 입자 현탁액의 여과기간과 투과기간에서 각각 평균비저항값을 실험적으로 구하고, 오랜시간의 투과 조작이 여과 평균비저항값에 미치는 영향과 여과케이크의 양을 감소시키면서 여과 평균비저항값을 구하므로 케이크 내부에서 일어나는 현상을 밝히고자 하였다.<sup>4)</sup>

여과 조작을 분석하기 위하여는 아래의 Darcy식이 사용된다.

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

이 식에서

V : volume of filtrate per unit filter area  
(m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>)

t : filtration time (sec)

ΔP : applied pressure (Pa)

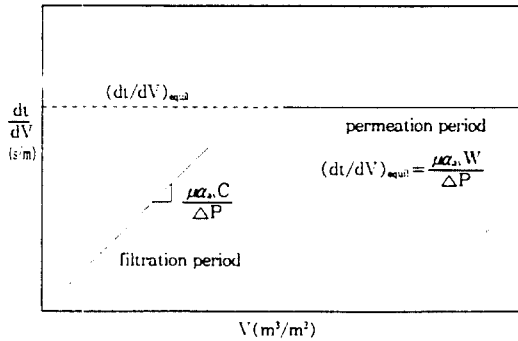


Fig. 1. Theoretical result of filtration-permeation.

$\mu$  : viscosity (Pa·s)

$\alpha_{av}$  : average specific resistance (m/kg)

$W$  : mass of dry cake per unit filter area (kg/m<sup>2</sup>)

$R_m$  : filter medium resistance (m<sup>-1</sup>)

$$C = \rho S / (1 - S/Sc) \quad (2)$$

여기서  $C$  : mass of solid per unit volume of filtrate (kg/m<sup>3</sup>)이다. 그러나 이 식의 사용에는 몇가지 문제점이 있다. 첫째는 여과 기간 전반에 걸쳐 filter medium의 막힘 현상이나 여과 도중의 filter medium의 swelling 현상 등으로 인해  $R_m$ 값이 변화하는 경우에도 그 변화를 무시하고 여과 평균비저항값을 구하는데 위에 나타난 식을 사용하고 있다. 둘째로 여과 초기에 침전하는 물질을 함유한 현탁액을 여과할 경우 여과가 진행되는 도중에 여과 대상액의 고체 분율인  $S$ 값이 일정한 상태이어야 하는데 실제 실험에서는 입자의 침전에 의해  $S$ 값이 계속 변화할 수도 있다.<sup>5)</sup> 또한 여과 평균비저항값도 여과 초기에는 상당히 다른 값을 가질 수 있다.<sup>6)</sup>

그리하여 Yim과 Ben Aim<sup>4)</sup>은 그가 개발한 새로운 실험방법으로 여과기간 동안의 filter medium과 케이크의 전체 저항값을 구하였다.

Fig. 1은 이론적인 filtration-permeation 결과를 나타내었다.

이 방법에서는 식(1)과 함께 다음 식을 사용한다.

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

이 식은 (1)식의 원형이다. 투과기간에는  $W$ 값이 크므로  $\alpha_{av}$ ,  $W$ 가  $R_m$ 에 비해 대단히 크게되어  $R_m$ 을

생략하고 위와 같이 쓸 수 있다. 여과기간에는 여과지 면적당 케이크의 질량인  $W$ 값이 여과가 진행됨에 따라 계속 증가하기 때문에 이 식을 사용할 수 없다. 여과-투과 방법은 기존의 여과 방법과 같은 보통의 여과 조작을 하다가 원할때 부터 입자없는 물을 공급하여 이미 형성된 케이크를 물이 투과하게 하는 조작이다. 투과 조작이 진행되는 동안에는 케이크의 질량의 증가가 없으므로 투과 속도  $dV/dt$ 가 계속 일정한 값을 유지하게 된다.

여과-투과방법에서는 첫 단계에서 여과가 진행되면서 시간에 따른 단위 면적당 여액의 부피를 측정하여 아래의 (4)식으로 여과 평균비저항값을 구할 수 있다. 이 첫 단계는 여과기간(filtration period)이다. 이때의 여과 평균비저항값을  $\alpha_{av,f}$ 로 표시한다.

$$\text{기울기} = \frac{\mu \alpha_{av,f} C}{\Delta P} \quad (4)$$

두번째 단계에서는 처음의 여과기간에서 형성된 케이크에 계속하여 입자없는 물을 투과시켜 일정한 투과량에 대한 시간을 측정하여 투과 속도를 측정한다. 이 단계를 투과기간이라 부르며 이 때의 평균비저항값을  $\alpha_{av,p}$ 로 나타낸다. 이론상 투과 기간의  $dt/dV$ 는 일정하여야 한다.

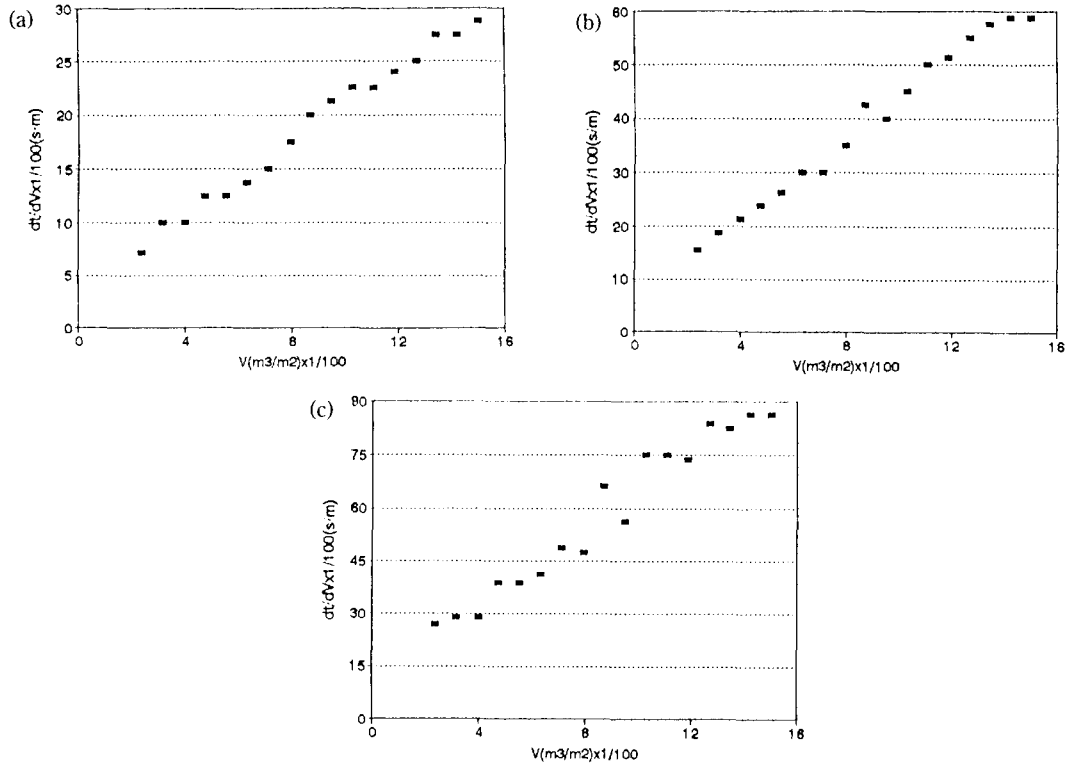
본 연구에서는 기존의 Buchner funnel 여과장치를 보완한 실험장치로 적정 압력을 유지하였으므로 일정한 압력하에서 케이크가 거의 형성된 후에 입자없는 물을 벽면을 타고 흐르도록 주입하여 현탁액과 입자없는 물이 혼합되는 것을 최대한으로 줄이면서 실험을 실시하였다. 투과 기간에는 여과지 단위 면적당 케이크의 질량  $W$ 가 일정하므로 아래의 식(5)을 이용하여  $\alpha_{av,p}$ 를 구할 수 있다.

$$(dt/dV)_{\text{equil}} = \frac{\mu \alpha_{av,p} W}{\Delta P} \quad (5)$$

그리하여 본 연구에서는 현탁액의 농도에 따른 여과 평균비저항값의 변화를 조사하였다. 또한 Tiller<sup>7)</sup>의 여과 이론에서의 가장 큰 가정인  $P_i$  개념을 부정하고, Yim이 제시한 여과에서 현탁액에 닿아있는 케이크 첫부분의 solid compressive pressure,  $P_s$ 가 0 아니고 유체 흐름의 속도로 인한 drag force에 의하면 어느 정도의 압력  $P_i$ 를 가진다는 가정<sup>8)</sup>을 실험적으로 증명하여 여과 케이크 내부에서 일어나는 현상을 이해하고자 하였다.

**Table 1.** The quality of filter medium

Filter medium	Weight(g/m <sup>2</sup> )	Thickness(mm)	Diameter( $\mu$ m)	Permeation time(s)
TOYO 5A	97	0.22	7.0	60
TOYO 5C	118	0.22	1.0	570

**Fig. 2.** Filtration results with 1% CaCO<sub>3</sub> suspension in TOYO 5C.

## II. 실험 재료 및 방법

### 1. 실험재료

#### 1) 현탁액의 제조

실험에 사용한 현탁액은 CaCO<sub>3</sub>를 105°C에서 4시간 건조, 평량하여 입자없는 물(실험실에서 사용하는 증류수를 ADVENTEC사의 TOYO 5C 여과지 두장을 겹쳐서 감압식 여과장치로 여과한 후 사용)에 24시간동안 500rpm에서 교반한 후 사용하였다. 본 실험에 사용한 현탁액의 농도는 1.0%와 0.1% (W/W)이다.

#### 2) 물의 점도

물의 점도(viscosity)는 각각의 조건에서 실험이 끝난 바로 직후에 투과액 및 여액의 액운을 측정하

여 그 온도에서의 물에 대한 점도를 참고문헌<sup>9)</sup>에서 찾아 사용하였다.

#### 3) Filter medium

본 연구에서 사용한 여과지는 ADVENTEC동양 여과제회사에서 제조한 염산과 불화수소산으로 복산 처리된 TOYO 5A와 TOYO 5C를 사용하였다. 제조회사에서 제공한 자료<sup>10)</sup>에 의하면 본 실험에 사용한 여과지는 고순도의 셀룰로오스 섬유여과지이며, 이들의 일반적인 성질은 Table 1과 같다.

### 2. 실험방법

본 실험에서 사용한 현탁액은 CaCO<sub>3</sub> 분말을 105°C에서 4시간 건조, 평량하여 입자없는 물에 500rpm으로 24시간이상 교반한 후 사용하였다. 여

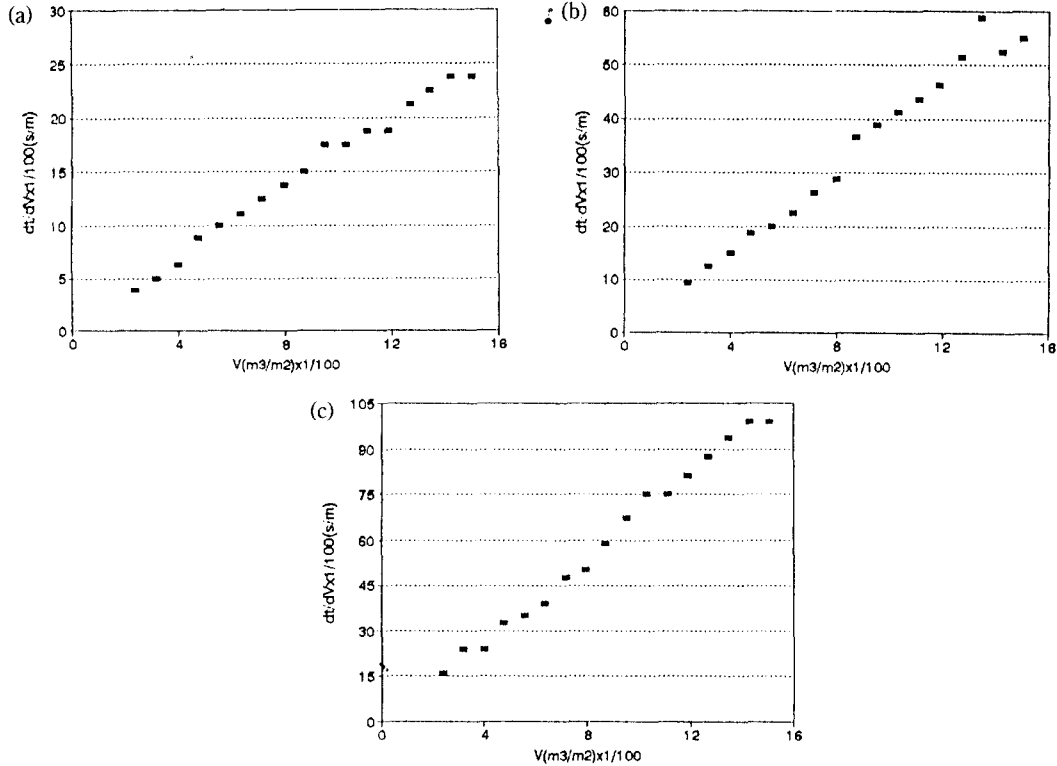


Fig. 3. Filtration results with 1%  $\text{CaCO}_3$  suspension in TOYO 5A.

과 시작 전 먼저 여과장치에 연결된 valve 1을 닫고 valve 2을 연 다음 aspirator를 작동시켜 air tank 내부의 압력을 manometer에 나타난 눈금을 보면서 실험을 위한 적정압력까지 감압시키었다. 그 후 valve 2를 닫고 aspirator의 작동을 정지시키었다. 시료를 홀더(holder)에 매우 조심스럽게 투입한 후 valve 1을 열어 여과를 시작한다. 여과가 진행되어 현탁액이 감소하고 원하는 정도의 케이크가 형성되면 Büchner funnel을 보완한 실험장치의 윗부분인 홀더(holder)에 입자없는 물을 매우 조심스럽게 첨가해 주면서 실시하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 1% $\text{CaCO}_3$ 현탁액의 여과실험

ADVENTEC TOYO 5C의 여과실험결과는 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2-a의  $dt/dV$  와  $V$ 의 관계 graph에서  $V(v/A)$ 가 15 m까지 여과실험을 진행하였다. 이는 전형적인 케이크 여과와 같은 그래프를 나타내었다.  $5.3 \times 10^4$

Pa의 압력하에서는  $dt/dV$  와  $V$  graph에서 기울기가  $1.58 \times 10^4 \text{ s/m}^2$ 으로 여과 평균비저항값( $\alpha_{av,t}$ )은  $8.4 \times 10^{10} \text{ m/kg}$ 으로 계산되었다. b의  $1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 에서 여과 평균비저항값은  $4.5 \times 10^{10} \text{ m/kg}$ 으로  $5.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 의 압력보다 거의 반정도가 감소한 값을 나타내었다. c의 graph에서 더 낮은 압력인  $8.2 \times 10^3 \text{ Pa}$ 에서 여과 평균비저항값( $\alpha_{av,t}$ )은 더욱 더 감소한  $3.8 \times 10^{10} \text{ m/kg}$ 을 나타내었다.

ADVENTEC TOYO 5A의 여과실험결과는 Fig. 3에 나타내었다. TOYO 5A는 TOYO 5C보다 성긴 filter로  $5.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 에서 TOYO 5C 경우와 유사한 여과 평균비저항값( $\alpha_{av,t}$ )인  $8.2 \times 10^{10} \text{ m/kg}$ 을 나타냈고, 낮은 압력  $1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 에서는  $\alpha_{av,t}$ 가  $4.4 \times 10^{10} \text{ m/kg}$ 로 나타났다. 더 작은 압력  $8.2 \times 10^3 \text{ Pa}$ 에서는  $1.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 에 비해  $\alpha_{av,t}$ 값이 상승된  $5.7 \times 10^{10} \text{ m/kg}$ 으로 나타났다. 압력이 더 적음에도 불구하고 앞의 압력보다  $\alpha_{av,t}$ 값이 상승한 이유로는 낮은 압력과 성긴 케이크 내부구조에서 미립자가 이동하여 케이크 내 좁은곳을 막아  $\alpha_{av,t}$ 값이 상승한 것으로 생각된다.

Table 2에 1%  $\text{CaCO}_3$  현탁액의 여과에서 압력 변

**Table 2.** Average specific resistance in 1% CaCO<sub>3</sub> suspension

Pressure(Pa)	Average specific resistance(m/kg)	
	TOYO 5C	TOYO 5A
$5.3 \times 10^4$	$8.4 \times 10^{10}$	$8.2 \times 10^{10}$ b
$1.3 \times 10^4$	$4.5 \times 10^{10}$	$4.4 \times 10^{10}$
$8.2 \times 10^3$	$3.8 \times 10^{10}$ a	$5.7 \times 10^{10}$ c

화와 filter medium의 종류에 따른 모든 실험결과치를 종합 정리하였다.

a) TOYO 5C의 경우  $5.3 \times 10^4$  Pa에서  $8.2 \times 10^3$  Pa까지 여과 압력이 감소함에 따라 여과 평균저항값 ( $\alpha_{av,f}$ )값도 감소 현상을 나타내는 데 이는 전형적인 현상이며 뒤에서 언급할 log-log graph 상에서 케이크의 압축성(compressibility)인 n을 결정하는데 중요한 값이다.

b)  $5.3 \times 10^4$  Pa과  $1.3 \times 10^4$  Pa인 압력변화에서 TOYO 5C (pore size 1  $\mu$ m정도)와 TOYO 5A(3

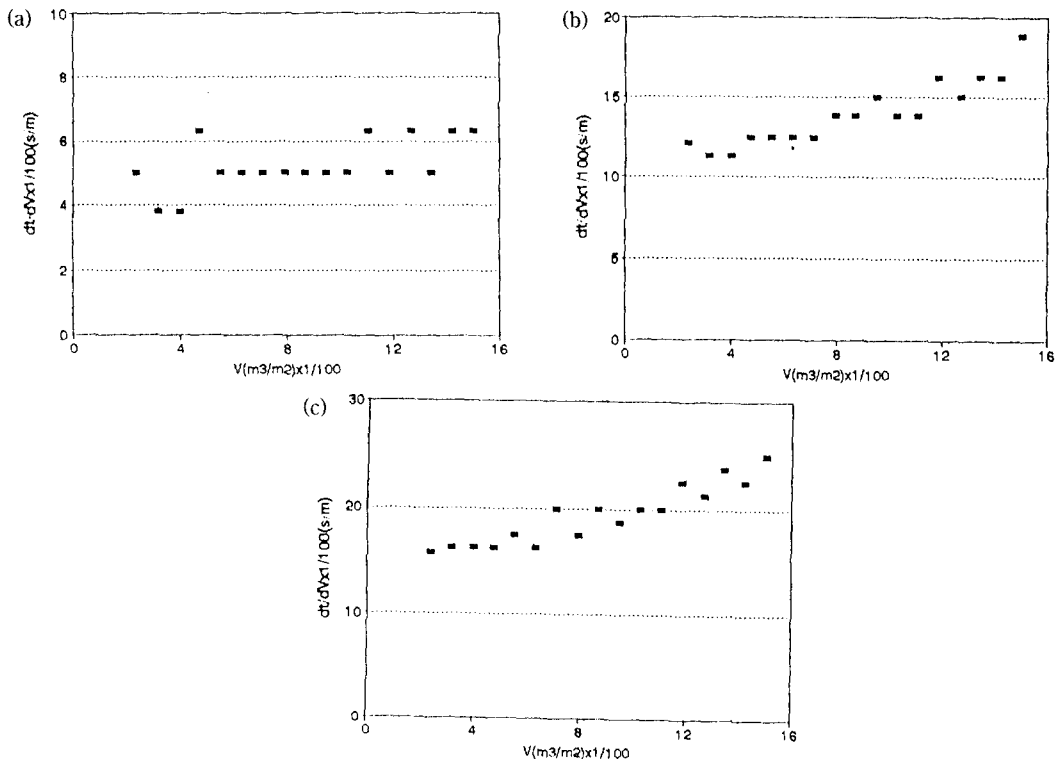
$\mu$ m정도)가 실험 오차 이내의 동일한 여과 평균비저항값을 나타내고 있어 일반적인 cake 여과 이론의 타당성을 입증한다. 즉 cake 여과에서는 여과 주체가 여과 대상 물질로 구성된 cake 이므로 filter의 종류에 따라 여과 평균비저항값이 변하지 않는다. 그러나 앞으로의 분석에서 이 이론이 한계가 있음이 밝혀진다.

c)  $1.3 \times 10^4$  Pa과  $8.2 \times 10^3$  Pa의 압력에서 TOYO 5A인 경우 낮은 압력에서 오히려  $\alpha_{av,f}$  값이 크게 나타나고 있는데 이는 낮은 압력에 생긴 cake 내부에 미립자가 이동되어 cake 내 좁은 곳을 막음으로  $\alpha_{av,f}$ 값이 상승된 것이라 생각된다.

**2. 0.1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액의 여과실험**

ADVENTEC TOYO 5C에서 여과실험결과를 Fig. 4에 나타냈다.

Fig. 4의 a에서는 dt/dV 와 V의 관계 도표에서 높은 압력인  $5.3 \times 10^4$  Pa에서 낮은농도(0.1%)의 현탁액인 경우 여액의 속도가 빨라 여과 평균비저항값 ( $\alpha_{av,f}$ )값을 구할 수가 없었다. b의  $5.2 \times 10^4$  Pa 보다



**Fig. 4.** Filtration results with 0.1% CaCO<sub>3</sub> suspension in TOYO 5C

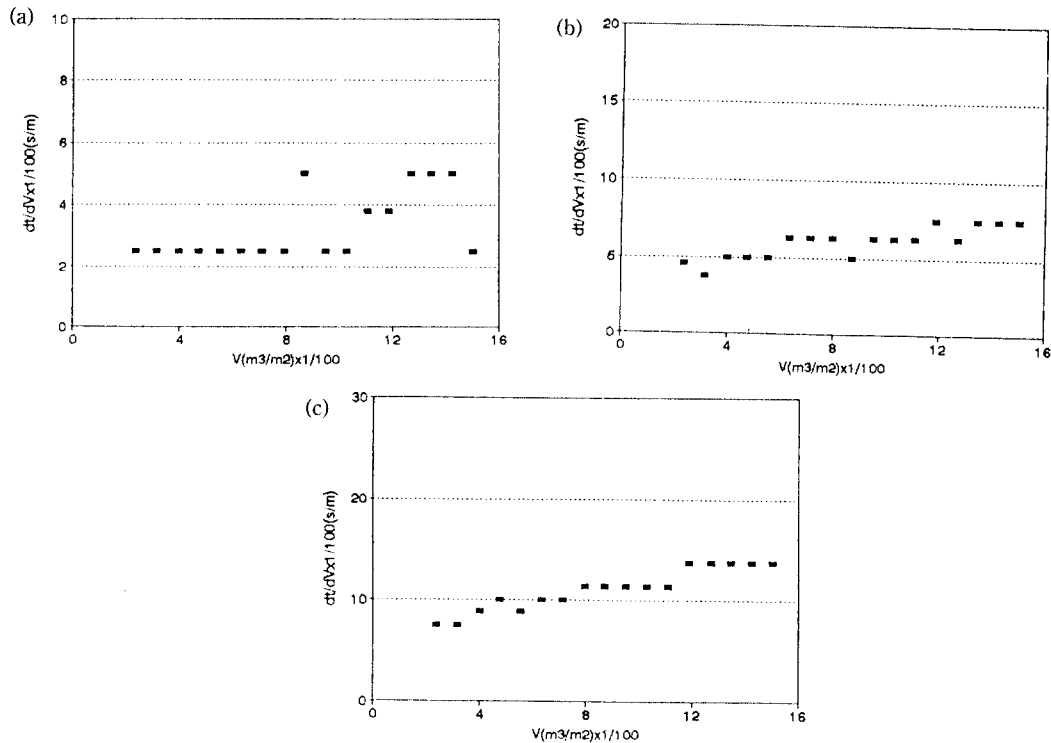


Fig. 5. Filtration results with 0.1% CaCO<sub>3</sub> suspension in TOYO 5A.

낮은 압력인  $1.3 \times 10^4$  Pa에서는 평균 비저항값( $\alpha_{av.f}$ ) 값의 결정이  $6.4 \times 10^{10}$  m/kg로 가능하였으며, c의  $8.2 \times 10^3$  Pa에서도 여과 평균비저항값( $\alpha_{av.f}$ )를  $5.4 \times 10^{10}$  m/kg을 얻었다. 이 결과 0.1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액에서 여과 압력이 감소함에 따른 여과 평균비저항값( $\alpha_{av.f}$ )이 감소로 1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액의 여과 결과보다  $\alpha_{av.f}$  값이 더 큰 경향을 보이는 데 이는 1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액 보다 0.1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액에서 유속이 대단히 빨라 첫 입자부터 상당한 정도의 drag force (FD)를 받는데 기인한다. 즉 케이크 윗부분이 상당한 정도로 눌리므로 케이크가 더 compact하게 되어 높은 여과 평균비저항값을 나타내게 된 것으로 생각된다.

ADVENTEC TOYO 5A에서 여과실험결과를 Fig. 5에 나타냈다.

Fig. 5의 a에는 비교적 높은 압력인  $5.3 \times 10^4$  Pa에서의 실험결과로서  $dt/dV$ 와  $V$ 의 graph에서 유속이 빨라 여과 평균비저항값을 구할수 없었다. 그러나 b의 그림에서는  $5.3 \times 10^4$  Pa보다 낮은 압력인  $1.3 \times$

$10^4$  Pa에서 평균 비저항값( $\alpha_{av.f}$ )  $3.6 \times 10^{10}$  m/kg, c에서는  $8.2 \times 10^3$  Pa에서 여과 평균비저항값( $\alpha_{av.f}$ )  $4.6 \times 10^{10}$  m/kg을 얻었다.

0.1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액에서 TOYO 5C의 경우  $5.3 \times 10^4$  Pa에서  $8.2 \times 10^3$  Pa까지 여과압력을 감소시키면 여과 평균비저항값이 감소하는 현상은 1% CaCO<sub>3</sub>와 비슷하며 이는 정통적인 여과 이론과 일치한다. TOYO 5A의 경우 압력  $5.3 \times 10^4$  Pa인 실험에서는 낮은 농도와 높은 압력에 기인한 매우 빠른 유속으로 인하여  $\alpha_{av.f}$ 의 결정이 불가능하였고, 압력  $1.3 \times 10^4$  Pa의 경우  $\alpha_{av.f}$  값은  $3.6 \times 10^{10}$  m/kg으로 1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액에 비해 오히려 낮은 값을 구하였는데 그 이유는 빠른 유속, pore size (3  $\mu$ m 정도)에서 일부의 입자가 쓸려 나감으로 케이크 질량이 감소하여  $\alpha_{av.f}$  값이 줄어든 것으로 생각된다.

### 3. compressibility, n, 과 P<sub>i</sub>의 결정

1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액의 압력변화에 따른 여과 실험 결과를 log-log graph로 나타낸 그림은 Fig. 6과 같다.

여과 압력,  $\Delta P$ 의 범위는  $8.2 \times 10^3$  Pa에서  $5.3 \times$

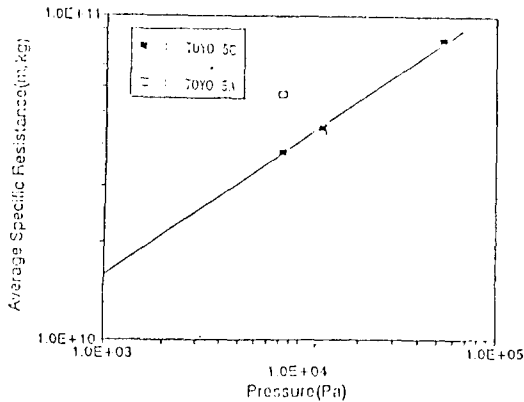


Fig. 6. Average specific resistance vs. filtration pressure.

$10^4$  Pa이었다. 이 그림에서 볼수 있는 바와 같이 실험 결과는 TOYO 5A인 경우  $8.2 \times 10^3$  Pa에서만 위 식을 벗어나고, 나머지는 log-log로 나타낸 graph에서 직선성을 나타내어 이 직선의 기울기인 케이크의 압축성(compressibility)  $n$ 의 값 0.44을 얻었다. Tiller의 정의에 의하면 이것은 normally compressible한 케이크이다. 이 직선을 수식으로 표시하면 아래와 같다.

$$\alpha_{av} = 1.19 \times 10^9 P_s^{0.44}$$

Tiller는 1953년부터 1979년에 걸쳐 "여과에서 공간율의 역할:I-IX" (the role of porosity in filtration)<sup>12,6,11-16)</sup>이라는 9편의 단일 주제논문을 발표하여 현대 여과이론을 확립시켰다. 그는 Grace<sup>17)</sup>의 광범위한 C.P.C.(compression permeability cell)의 실험결과를 토대로 1955년 cake를 구성하는 고체입자가 받는 압력  $P_s$ 와  $\alpha$ ,  $P$ 와 공간율  $\epsilon$ 의 관계를 power function으로 다음과 같이 표시하였다.

$$\alpha = aP_s^n \quad (1)$$

$$1 - \epsilon = BP_s^\beta \quad (2)$$

$P_s$ : solid compression pressure (Pa)

여기서 입자의 성질을 나타내는 상수  $a$ ,  $n$ ,  $B$ ,  $\beta$ 는 C.P.C. 실험 결과를 log-log graph에 plot하여 결정한다. 이 4개의 상수 중  $n$ 은 압축성이라 하며 케이크의 성질을 나타내는 지표로 쓰여진다.  $n=0$  이면 평균 비저항값  $\alpha$ 는  $P_s$ 에 무관하게 일정한 값이 되어 식(1)에 의하여 여과에서 압력을 증가시키면 여과속

도는 압력에 비례한다. 이것을 비압축성 케이크 (incompressible cake)<sup>7)</sup>라고 규정하였다. 그러나 Tiller는 1983년 그의 과거의 개념을 바꾸어 다음과 같이 정의<sup>18)</sup> 하였다.

$n = 0$  incompressible cake

$n = 0.2$  slightly compressible cake

$n = 2/3$  normally compressible cake

$n = 1.0$  very compressible cake

$n = 1.5$  extremely compressible cake

여과 과정에서 사용되고 있는 여과 케이크에서의 경제조건 개념은 Tiller<sup>11)</sup>가 발표한 이론으로서 여과 현상을 설명하는 기본적인 개념이다. 현재까지 여과에서의 여과 평균비저항값  $\alpha_{av}$ 를 C.P.C.실험에서 구한 (1)식과 이 경제조건에서 계산하기 위하여 Ruth<sup>20)</sup>가 제안한 아래 식을 사용하고 있다.

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta P}{\int_0^{\Delta P} \frac{dP_s}{\alpha}} \quad (3)$$

이 식은 압축성이 작은 케이크에 대하여는 잘 적용되나 압축성  $n$ 이 0.7을 넘으면 큰 오차가 발생하는 경우가 많다. (1)식을 대입하면

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta P}{\int_0^{\Delta P} \frac{dP_s}{aP_s^n}} = (1-n)^a \Delta P^n \quad (4)$$

으로 되어  $n > 1$  이면 여과에 의한 평균 비저항값  $\alpha_{av}$ 는 음의 값을 가지게 되어 어떤 경우의 케이크에서도  $\alpha_{av}$  값은 0보다 큰 값을 가지는 것이 실험에 의하여 명확하다. 이 곤란한 점을 Tiller의  $P_i$  개념을 대입하면

$$\begin{aligned} \alpha_{av} &= \frac{\Delta P}{\int_0^{P_i} \frac{dP_s}{aP_s^n} + \int_{P_i}^{\Delta P} \frac{dP_s}{aP_s^n}} \\ &= \frac{a\Delta P}{P_i^{1-n} + \frac{\Delta P^{1-n}}{1-n} - \frac{P_i^{1-n}}{1-n}} \\ &= \frac{a(1-n)\Delta P}{\Delta P^{(1-n)} - nP_i^{(1-n)}} \end{aligned} \quad (5)$$

의 식이 되어 분자의  $(1-n)$ 이 음수가 되고,  $\Delta P$ 는  $P_i$ 보다 매우 큰 값을 가지므로 이  $\Delta P^{1-n}$ 이  $P_i^{1-n}$ 보다 작아 분모도 음의 값을 가지게 되어 이 결과로  $\alpha_{av}$ 는 양의 값을 가지게 된다. Tiller의 개념은 식(5)에서

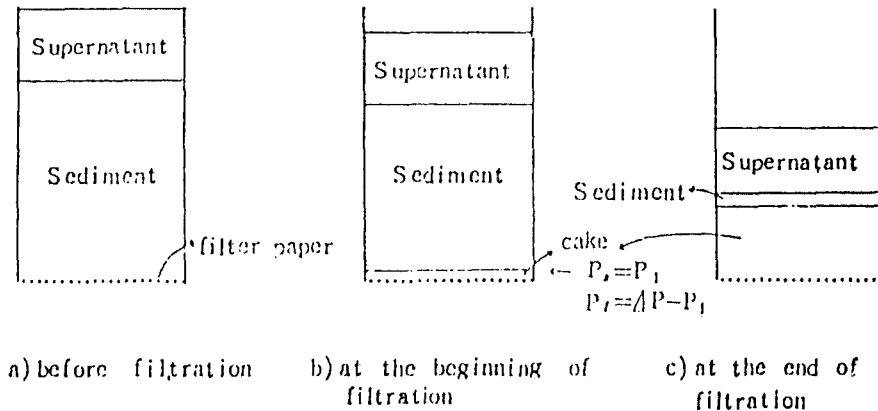


Fig. 7. Filtration with fast sedimentation.

Table 3. Solid compressive pressure of the first cake layer,  $P_1$  unit : m/kg

Pressure(Pa)	$P_1$ (Pa)
$5.3 \times 10^4$	$1.88 \times 10^4$
$1.3 \times 10^4$	$4.05 \times 10^3$
$8.2 \times 10^3$	$3.15 \times 10^3$

\*Pa는 Pascal,  $\alpha$ 는 m/kg으로 표시된 경우의 식이다

$n$ 이 1보다 큰 경우에  $\alpha$ 가 음의 값을 가지는 모순점을 해결하기 위한 방편에서 나왔다고 볼 수 있다.

여과가 진행되는 동안에는 침전물이 케이크로 점차 바뀐다고 생각하고 그 과정을 Fig. 7에 나타내었다.

케이크 형성과정에서의 경계조건은

cake-sediment 면 :  $P_s = P_1 \quad P_L = \Delta P$

cake-filter 면 :  $P_s = \Delta P \quad P_L = 0$

$P_L$  : liquid pressure ( Pa )

이라 가정하였다.  $P_1$ 은 고체침전물이 케이크 표면에 미치는 중량  $F_g$ 와 이 표면을 구성하고 있는 케이크의 첫 면 입자들이 유체의 흐름에 의해 받는 drag force,  $F_D$ 에 기인한다고 본다. 이 개념으로는  $CaCO_3$  현탁액 같은 상당한 침전 속도를 가지는 물질의 여과현상을 침전현상과 분리하여 고찰할 수 있는 장점이 있다.

위의 경계조건을 사용하면

$$\alpha_{av} = \frac{\Delta P - P_1}{\int_{P_1}^{\Delta P} \frac{dP_s}{aP_s^n}} = \frac{a(1-n)(\Delta P - P_1)}{\Delta P^{1-n} - P_1^{1-n}} \quad (6)$$

의 식이 된다. 실제로  $P_1$ 의 작은 값이므로  $(\Delta P - P_1)$  값의  $P_1$ 은 큰 역할을 못하나  $n$ 이 1보다 큰 경우 분모의  $P_1$ 의 값은 전체 식에 매우 큰 기여를 한다. 아직은  $P_1$  값을 직접 구할 수 있는 방법이 없다. 다만 여과 실험에서 구한  $\alpha_{ava}$  값과 C.P.C.의 결과를 사용하여 (6)식에서 구한  $\alpha_{av}$  값을 비교하여  $P_1$  값을 구할 수 있을 뿐이다.

그리하여 이 실험결과를 이론적으로 분석하기 위하여 여과의 경계조건에서 사용한 식(6)에서  $P_1$ 을 구하였다. 여과 압력인  $5.3 \times 10^4$  Pa,  $1.3 \times 10^4$  Pa, 그리고  $8.2 \times 10^3$  Pa에서  $\alpha_{av}$ ,  $a$ ,  $n$ 을 이용하여  $P_1$  값을 산출한 결과치를 Table 3에 나타내었다.

$5.3 \times 10^4$  Pa에서  $1.68 \times 10^4$  Pa,  $1.3 \times 10^4$  Pa에서  $4.05 \times 10^3$  Pa,  $8.2 \times 10^3$  Pa에서  $3.15 \times 10^3$  Pa로 압력이 높으면 빠른 유속이 존재하므로  $P_1$ 이 크고, 압력이 낮으면 상대적으로 느린 유속으로 인하여  $P_1$  값이 작아지는 결과를 나타낸다. 이는 Yim과 Ben Aim<sup>9)</sup>의 이론에서 논리적으로 예측되어질 수 있는 결론이다.

#### IV. 결 론

현탁액의 농도에 따른 여과 평균비저항값의 변화를 조사하여 여과 케이크 내부에서 일어나는 현상을 규명하기 위하여 filtration-permeametry 방법을 이용하여 1%와 0.1%  $CaCO_3$  현탁액을 여과실험을 수행한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 1%  $CaCO_3$  현탁액 여과의 경우 비교적 높은 압력에서는 TOYO 5C, 5A의 차이없이 power function에 잘 일치하며( $R=0.99$ ),  $a$  값은  $1.19 \times 10^9$  Pa이고  $n$  값은 0.44이다. 이는 현재 통용되는 여



과 이론 즉 케이크 여과에서 여과 매체 즉 여과지는 여과 평균비저항값에 영향을 미치지 않는다는 이론과 일치한다.

(2) 0.1% CaCO<sub>3</sub> 현탁액 여과의 경우에는 TOYO 5C에서 power function이 성립하였으나 전체적인 평균비저항값은 1%에 비해 높았다. 현재의 여과 이론 (즉 여과 평균비저항값은 농도에 무관하다)이 적용될 수 있는 농도에서 하한이 있으며 현재의 농도는 이 범위를 벗어났음을 뜻한다. 동일조건의 TOYO 5A에서는 전혀 다른 평균비저항값이 측정되었으며 이 또한 (1)번 결론과 일치하지 않는다.

(3) 여과 실험 결과와 새로운 여과 이론에서 케이크의 첫 입자가 받는 고체 압력 P<sub>1</sub>의 값을 구하였다. 이 값은 빠른 유속을 가지는 조건(즉 높은 압력)에서 커서 새로운 여과 이론의 타당성을 입증할 수 있었다.

### 참고문헌

- 1) Tiller, F. M. : The role of porosity in filtration : Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's law. Ch.E.P., 49, 9, p467-479, 1953.
- 2) Willis, M. S., Collins, R. M. and Bybyk, S. : Practical implication of internal permeability profiles", 4th world filtration congress, p1.19-1.31, 1986.
- 3) Ruth, B. F. : Correlating filtration theory with industrial practice", Industrial and Engineering Chemistry, 38, 6, p564-571, 1946.
- 4) Yim, S. S., Ben Aim, R. : Highly compressible cake filtration: Application to the filtration of flocculated, 4th world filtration congress, A1-A6, 1986.
- 5) 황인태 : Filtration-Permeation 방법의 제특성에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대 학교, 1989.
- 6) Tiller, F. M., Cooper, H. R. : The role of porosity in filtration IV. constant pressure filtration." A.I.C.E. Journal, 6, 4, p595-601, 1960.7.
- 7) Tiller, F. M. : The role of porosity in filtration part 2 : analytical equation for constant rate filtration, Chem. Eng. Progr., 51, 6, p282-290, 1955.
- 8) 임성삼, 황인태 : Filtration-Permeametry에 대한 연구, 대한환경공학회지, Vol. 10, No. 2, p56-63, 1988.
- 9) Reynolds, T. D. : Unit operation and process in environmental engineering, Brooks/Cole Engineering Division, p545, 1982.
- 10) アドベンテック 동양여지주식회사 ADVENTEC 종합 카탈로그, Vol.46, 1989.
- 11) Tiller, F. M., Haynes, J., Lu, W. M. : The role of porosity in filtration VII. Effect of side-wall fraction in compression-permeability cell., A.I.C.E. Journal, 18, 1, p13-20, 1972.
- 12) Tiller, F. M., Shirato, M. : The role of porosity in filtration VI. New definition of filtration resistance, Alche. Journal, 10, 1, p61-67, 1964.
- 13) Tiller, F. M. : The role of porosity in filtration III. Variable pressure variable rate filtration., A.I.C.E. Journal, 4, 2, p170-174, 1958.
- 14) Tiller, F. M., Cooper, H. R. : The role of porosity in filtration V. porosity variation in filter cakes., A.I.C.E. Journal, 8, 4, p445-449, 1962.
- 15) Tiller, F. M., Lu, W. M. : The role of porosity in filtration VIII. cake nonuniformity in compression-permeability cells., A.I.C.E. Journal, 18, 3, p569-572, 1972.
- 16) Tiller, F. M., Green, T. C. : The role of porosity in filtration IX. skin effect with highly compressible materials., A.I.C.E. Journal, 19, 6, p1266-1269, 1973.
- 17) Grace, H. P. : Resistance and compressibility of filter cake." Ch.E.P., 49, 6, p303-318, 49, 7, p367-377, 1953.
- 18) Tiller, F. M., Hong, L. L. : Hydraulic deliquoring of compressible filter cake.", A.I.C.E. Journal, 29, 2, p297-305, 1983.