

Cake Filtration에서 공극률과 비저항의 변화특성

윤석호 · 강 용 · 고향희

충남대학교 공과대학 화학공학과
(1987년 4월 16일 접수, 1987년 6월 5일 채택)

Variation of Porosity and Specific Resistance in Cake Filtration

S.H. Yoon, Y. Kang and H.H. Ko

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Chungnam National University
(Received 16 April 1987; accepted 5 June 1987)

요 약

Cake filtration에서 cake의 공극률과 국소여과 비저항이 filter cake에 가해지는 압력에 따라 변화하는 특성을 단면적이 38.48 cm^2 되는 filter cell에서 실험적으로 고찰하였다.

실험에 사용된 슬러리는 탄산칼슘, Talc(I) 및 Talc(II)의 세종류 입자를 각각 물에 섞어서 사용하였는데, 입자의 첨가량은 30 wt %로써 고농도 슬러리였다. Filter cake에 가해지는 압력은 외부에서 가해지는 압력과 실린더 벽과 cake의 마찰에 의한 에너지 손실을 고려한 실제 cake에 가해지는 압력을 모두 고려하였다.

실험결과 Filter cake의 공극률은 압력의 증가에 따라 log-log 그래프에서 선형적으로 감소하였으며, 국소여과 비저항은 압력의 증가에 따라 log-log 그래프에서 선형적으로 증가하였다.

다공성 입자인 구조토를 첨가한 슬러리의 경우 filter cake의 공극률의 현저한 증가를 가져와 국소여과 비저항을 줄일 수 있었다.

Abstract—Variations of porosity and specific local resistance in cake filtration were studied in a filter cell by increasing filtration pressure. The cross sectional area of filter cell was 38.48 cm^2 , and the slurries used were made of water and CaCO_3 , Talc (I) and Talc (II), respectively. The amount of solids added to water was 30wt% to make highly concentrated slurries.

The net loading pressure to the filter cake as well as the pressure to the filter cell were considered to verify the dependence of porosity and specific resistance on the loading pressure.

From the experimental results, the cake porosity decreased and the specific local resistance increased linearly with the increasing pressure in log-log plots, respectively.

The addition of the porous dialite as a body-feeding filter aid into slurries increases the cake porosity and decreases the specific local resistance of the filter cake.

1. 서 론

제당, 비료, 식물성 밀크류, Oil, 맥주 등의 공장에

서 필연적으로 사용되는 여과 공정(filtration process)은 산업의 발달에 따라 일반화학공장, 식품공장 및 제약공장 등에서 매우 다양하게 그 수요가 급증하고 있

며, 특히 공해방지 및 환경보호의 차원에서 여과 공정은 원가절감을 위한 각 공장의 주요 문제점으로 최근 대두되기 시작하였다.

여과의 이론적 해석은 Carman[1, 2], Ruth[3, 4] 등에 의해 압축투과 기술이 도입된 이후 대부분 압축투과 실험과 실제 여과 실험에서 얻은 자료들 사이의 실험적인 상호관계를 얻는 것에 중점을 두어왔다. 그러나, 이들 연구들은 cake filtration의 내부 메카니즘에 대한 예측을 하는데 큰 도움을 주지 못하였을 뿐만 아니라, 실제 공장에서 cake의 국소적인 조건(local condition)들이 전체 여과 공정에 결정적인 역할을 한다는 주장들이 대두되면서 이에 대한 이론적, 실험적 연구가 Grace[5, 6], Tiller[7, 8], Ingmanson[9], Kottwitz and Boylan[10], 그리고 Shirato[11, 12, 13, 14] 등에 의해 진행되어 왔다.

압축투과 실험에서 얻은 결과들로부터 여과 특성을 예측하기 위한 가장 중요한 가정은 정적 상태(static state)에 있는 압축된 cake의 국소 여과 비저항(local specific filtration resistance)과 국소 공극률(local porosity)이 동적인 상태(dynamic state)의 여과 cake의 그것들과 같다는 것으로 알려졌다[14]. 여과를 해야 하는 혼합물이 특히 고농도 슬러리인 경우는 여과 cake의 내부에서 액체 및 고체의 흐름 특성이 전체 여과 특성에 중요한 영향을 준다고 보고되어 있다[7, 8, 14].

지금까지 보고 되어온 문헌들에 의하면[7, 8, 14] filter cake의 내부 메카니즘이 전체 여과 공정의 특성을 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있으므로, 본 연구에서는 filter cake의 공극률과 cake에 가해진 압력 사이의 관계, cake에서 액체의 투과율과 가해진 압력 사이의 관계 및 국소 비저항(local specific filtration resistance)과 압력과의 관계 등을 규명하여, cake 내부의 여과 메카니즘을 예측할 수 있는 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 이 론

2-1. 공극률 및 국소여과 비저항

압축-투과 실험에서 압축 평형시 cake의 두께를 L 이라 하면 그때의 porosity는 식 (1)과 같이 쓸 수 있으며,

$$\varepsilon = \frac{A_2 L - W/\rho_s}{A_2 L} = 1 - \frac{W}{A_2 \rho_s L} \quad (1)$$

투과 실험에서 액체의 투과율은 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$q = \frac{A_1}{A_2} U = - \frac{A_1}{A_2} \frac{dh}{d\theta} \quad (2)$$

여기서, q 는 액체의 투과율, U 는 Permeability gauge의 투과율, h 는 permeability gauge의 액면 높이, θ 는 시간, W 는 건조 cake의 질량, ρ_s 는 cake의 density 그리고 A_1 과 A_2 는 각각 permeability gauge의 단면적 및 실린더의 단면적을 나타낸다.

한편, 실린더 내부의 압력 ΔP_c 는 식 (3)과 같이 쓸 수 있으며,

$$\Delta P_c = (h - h_0) \frac{\rho}{g_c} \quad (3)$$

액체의 투과율 q 는 ΔP_c 와 식 (4)와 같은 관계를 가지고 있으므로[14]

$$q = \frac{g_c \Delta P_c}{\mu \alpha (W/A_2)} \quad (4)$$

식 (2), (3), (4)에서 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$- \frac{A_1}{A_2} \frac{dh}{d\theta} = \frac{\rho g (h - h_0)}{\mu \alpha (W/A_2)} \quad (5)$$

여기서, h_0 는 실린더 액면의 높이이고, μ 는 액체의 점도 그리고 α 는 투과 비저항을 나타낸다.

따라서 식 (5)를 투과시간 $\Delta \theta$ 동안 적분하면 식 (6)과 같은 filter cake의 투과 비저항을 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{A_2^2 \rho g \Delta \theta}{A_1 \mu W \ln \left(\frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0} \right)} \quad (6)$$

여기서, h_1 및 h_2 는 각각 filtration의 시작과 끝의 permeability gauge의 높이를 나타낸다.

따라서, 식 (1), (2), (6)으로 부터 각각의 경우 filter cake의 porosity 및 specific filtration resistance를 구할 수 있다.

2-2. Filter Cake 내부에서의 평균 수직 압력

Shirato[11, 14] 등에 의하면 피스톤에 가해지는 추의 압력은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 filter cake내에서 수직압력 P_v 와 수평압력 P_h 으로 나누어지는데 이들간의 관계는 식 (7)과 같이 정지토 압력계수(coefficient of earth pressure at rest) k_0 를 비례상수로 하는 비례관계가 성립한다고 하였다.

$$P_h = k_0 P_v \quad (7)$$

한편, 실린더 측벽과 filter cake 간의 마찰계수를 f 라 하고, 부착력(cohesive force)을 C 라 하면, 수직압

력이 cake 내부에 균일하게 분포되어 있다는 가정하에 식 (8)과 같은 force balance를 cake의 미소 높이 dz 에 대해 세울 수 있다.

$$\frac{\pi D^2}{4} P_v - (P_v + dP_v) = (k_o f P_v + C) \pi D dz \quad (8)$$

여기서, D 는 실린더의 직경이고, z 는 cake의 표면으로부터의 거리를 나타낸다.

식 (8)에서 $z=0$ 일 때 $P_v = P$ 이므로 P_v 에 대해 정리하면 식 (9)를 얻을 수 있는데,

$$P_v = \frac{1}{k_o f} \left\{ \frac{k_o f P + C}{\exp(4 k_o f z/D)} \right\} - C \quad (9)$$

$z=L$ 일 때 $P_v = P_r$ 이므로 P_r 는 식 (10)과 같이 되며

$$P_r = \frac{1}{k_o f} \left\{ \frac{k_o f P + C}{\exp(4 k_o f L/D)} \right\} - C \quad (10)$$

따라서, filter cake 내부에서의 평균 수직압력 P_s 는 식 (11)과 같이 얻을 수 있다.

$$P_s = \frac{1}{L} \int_0^L P_v dz = \frac{P + (C/k_o f)}{4 k_o f L/D} \left\{ 1 - \exp(-4 k_o f L/D) \right\} - \frac{C}{k_o f} \quad (11)$$

3. 실험

3-1. 실험장치 및 방법

본 연구의 각 조업조건에 따른 filter cake 내부에서의 공극률(Porosity), 투수율(Permeability) 및 국소여과 비저항(local specific filtration resistance) 등의 물리적 특성 및 이의 변화양상을 측정하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같은 압축-투과장치(Compression-permeability cell)를 제작, 사용하였다. 압축-투과장치는 실린더와 피스톤 및 부속장치들로 구성되어 있는데, 실린더의 단면적은 38.48 cm^2 이고, 실린더와 피스톤의 높이는 각각 13.4 cm , 16 cm 이었으며, 피스톤 위에서 수직으로 일정량의 압력을 가하였는데, 피스톤에 의해 실린더 내부의 cake에 가해지는 압력은 실린더 하반부와 피스톤의 상반부에 연결된 dial gauge에 의해 측정하였다.

Dial gauge는 실제의 압력차와 gauge에 나타난 압력이 보정된 것을 사용하여 차압을 보정하였으며, dial gauge에 의해 측정된 값은 실제로 실린더 내부의 cake에 가해진 압력이므로 피스톤의 위에서 수직으로 가해지는 압력(가한 압력)에서 dial gauge에 의해 측

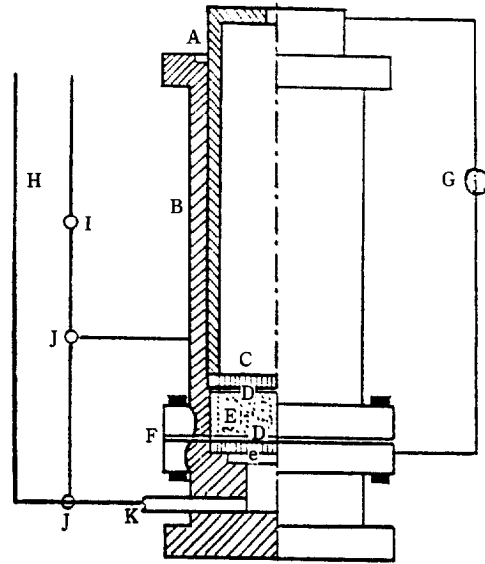


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

- | | |
|---------------------|-----------------------|
| A. Piston | G. Dial Gauge |
| B. Cylinder | H. Permeability Gauge |
| C. Perforated Plate | I. Syphon |
| D. Filter Paper | J. Three Way valve |
| E. Filter Cake | K. Water Inlet |
| F. Flange | |

정된 압력을 뺀 값을 피스톤과 실린더 벽면간의 마찰에 의한 압력손실로 간주하였다.

실린더와 slurry 및 피스톤과 slurry의 접촉면에는 각각 다공판과 filter paper를 부착시켜 사용하여 액체와 여과 cake의 분리가 용이하도록 하였으며, 압축된 filter cake의 두께를 각 조건에 따라 측정하기 위하여 실린더 및 피스톤은 투명한 아크릴을 사용하였는데, 실린더는 두께가 2 cm 되는 아크릴관을, 그리고 피스톤은 아크릴 봉을 사용하였다. 실린더 하반부에 filter cake로부터 다공판을 통해 나온 물을 filter cake로부터 분리시키기 쉽도록 다공판의 구멍이난 부분 바로 밑부분을 흡을 판 황동판을 설치하였으며, 다공판을 통해 나온 물을 모아 그 양을 측정하기 위해 이 황동판옆을 구멍을 뚫어 Permeability gauge와 valve를 통해 연결하였다.

투수실험에서 filter cake를 통해 투과되는 물의 양을 측정하기 위해 syphon을 permeability gauge에 three way valve를 통해 연결하여 사용하였으며, 변수의 투과법[14]으로 cake의 밑부분으로부터 물을 통과시켜 일정시간 통과된 물의 양을 측정하였다.

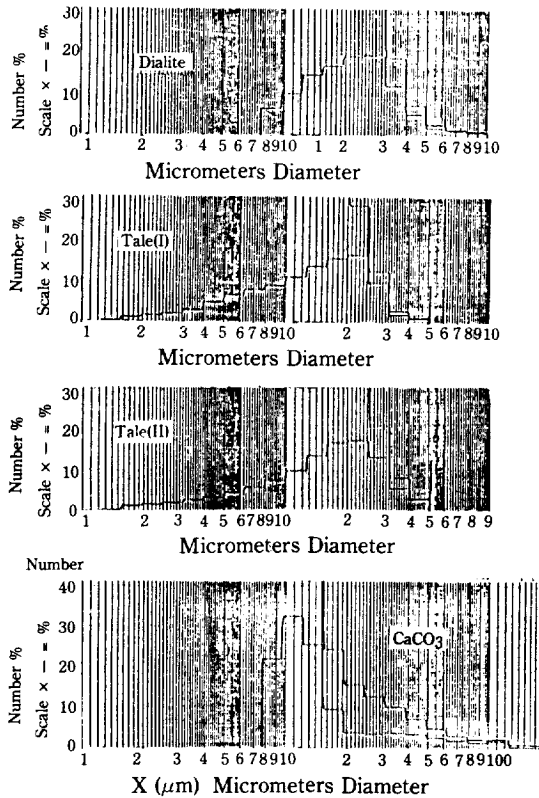


Fig. 2. Size frequency of filter cake used in this study.

물의 투과 압력은 permeability gauge내의 수위와 실린더내의 수위의 차로 부터 구하였으며, 일정시간 filter cake를 통과한 물의 양은 permeability gauge에 의해 측정하였다. 실린더내의 수위는 syphon에 의해 측정하였으며, 물의 투과시 수온은 일정하도록 하였으며 (25°C), 투수실험 후 filter cake는 건조기에 건조하여 건조 cake의 질량을 측정하였다.

본 실험에 사용한 slurry는 밀도가 각각 2.58, 2.90, 2.84인 CaCO_3 , Talc(I) 및 Talc(II)를 물에 섞어서 만들었는데 입자의 첨가량은 30 wt%이었으며, 규조토를 첨가하여 slurry를 만든 경우는 상기 각 입자를 섞어 만든 슬러리에 규조토를 2 wt% 첨가하였다.

본 실험에 사용한 규조토, CaCO_3 , Talc(I) 및 Talc(II) 등 각각의 입자크기 분포는 Fig. 2에서 보는 바와 같은 number-size distribution을 나타냈는데 이는 Coulter Counter(Model TA II)에 의해 측정된 결과이다.

압축-투과 실험에선, 제작된 실린더에 여과하고자 하는 슬러리를 넣고 피스톤에 수직압력을 주어 평형 압력

에 도달되었을 때 filter cake의 두께와 투과액의 양을 각각 측정하였다.

압축평형점은 filter cake가 전체 하중량을 지탱한 상태이므로 일정 압력을 피스톤에 수직으로 가하여 피스톤이 더 이상 강하지 않을 때를 택하였는데 본 실험의 경우 피스톤에 하중을 가한 후 대략 2시간 정도 후에 압축평형에 도달하였다. 본 실험에서 가해진 압력의 범위는 53~343 KPa 이었다.

4. 결과 및 고찰

압축-투과 실험에서 추에 의해 피스톤에 가해진 압력은 실린더 내부의 마찰손실 때문에 전부 filter cake에 전달될 수 없는데, 평형압력에 도달된 뒤에 실린더 내부의 filter cake의 밑면에 가해진 압력 P_f 는 dial gauge로 측정할 수 있다. 이렇게 측정된 filter cake 밑면의 압력과 피스톤에 가해진 추에 의한 압력의 비율을 피스톤에 가해진 압력 P 를 145 KPa 로 일정하게 유지하면서 탄산칼슘과 Talc(I), Talc(II)의 슬러리를 사용한 반복 실험 결과 평형압력에 도달된 후 filter cake의 두께에 대해 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3에서 P_f/P 는 filter cake의 최종두께 L 이 감소함에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

본 실험과 같은 조건에서 P_f/P vs. L (Fig. 3)의 data로 부터 식 (10)을 이용하여 최소자승법의 편차를 최소화하는 상수 k_0 와 C 를 구하였는데 각각 0.0875와 12.8(g/cm^2)를 얻었다.

이들 두 상수값을 이용하여 식 (11)으로 부터 filter cake와 실린더 벽면과의 마찰을 고려한 filter cake에

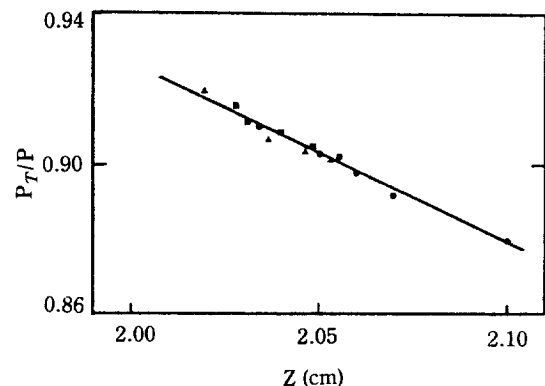


Fig. 3. Fraction of transmitted pressure with the variation of filter cake thickness.

● : Talc(I), ■ : Talc(II), ▲ : CaCO_3

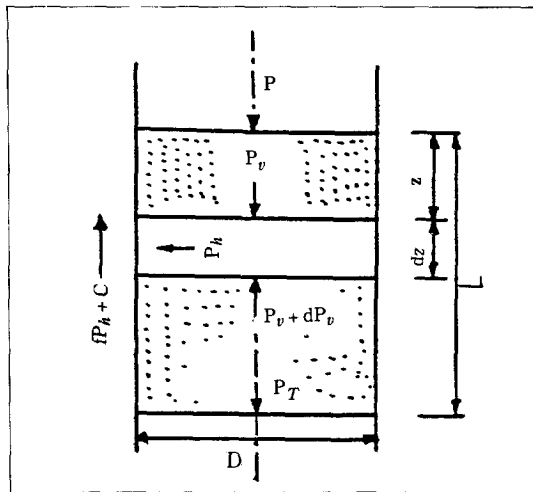


Fig. 4. Schematic diagram of vertical and horizontal pressures in compression-permeability cell.

가해지는 압력 P_s 를 구할 수 있다.

압축-투과 실험에서 피스톤에 가해지는 압력 P 와 filter cake에 가해지는 압력 P_s 의 변화에 따라 각각 압력 평형점에 도달되었을 때의 filter cake의 공극률을 식 (1)에 의해 구할 수 있으며, 이를 탄산칼슘, Talc(I) 및 Talc(II)의 고농도(30 wt %) 슬러리에 대하여 각각 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 filter cake의 공극률은 압력 P , P_s 의 증가에 따라 log-log 그래프에서 선형적으로 감소하였다.

Cake filtration에서 여과 효과를 증진하는 방법의

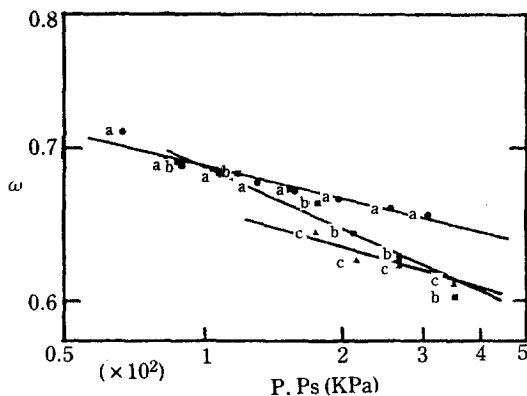


Fig. 5. Porosity variation in filter cake.

solid: CaCO_3 CaCO_3 Talc(II) Talc(II) Talc(I) Talc(I)
pressure: P P_s P P_s P P_s

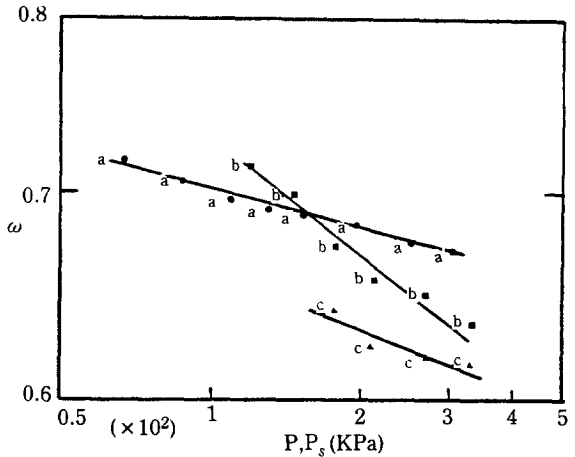


Fig. 6. Porosity variation in filter cake with dia-ltd.

a \bullet b \blacksquare c \blacktriangle
solid: CaCO_3 CaCO_3 Talc(II) Talc(II) Talc(I) Talc(I)
pressure: P P_s P P_s P P_s

하나로 다공성 입자로 압력진[16-18] 구조토를 탄산칼슘, Talc(I) 및 Talc(II)의 슬러리에 각각 2 wt % 첨가한 경우의 cake의 공극률을 P , P_s 의 변화에 따라 Fig. 6에 나타내었는데, 이 경우 역시 log-log 그래프에서 총 공극률은 P , P_s 의 증가에 따라 선형적으로 감소하였다.

Fig. 5와 6에서 filter cake의 공극률이 구조토를 소량 첨가함으로써 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 구조토 내부의 pore 때문인 것으로 판단된다. 구조토는 내부에 미세한 기공을 다량 포함하고 있어서 cake filtration의 효율을 증진시키는 것으로 알려져 있다 [18-21].

압축-투과 실험에서 형성된 filter cake에 대한 투수 실험의 결과 식 (6)에 의해서 국소여과 비저항을 구할 수 있으며, 이를 압력 P , P_s 에 대하여 Fig. 7과 8에 나타내었다.

Fig. 7에서 탄산칼슘, Talc(I) 및 Talc(II)의 고농도 슬러리에 압력이 가해지면서 filter cake 내부에서의 국소여과 비저항 α 는 log-log 그래프에서 선형적으로 증가하였다.

이와같은 경향은 압축성 cake의 여과시에 관찰될 수 있는 현상으로 cake에 가해지는 실제 압력 P 와 여과 비저항간에는 식 (12)와 같은 식이 일반적으로 성립되는 것으로 알려져 있다[22].

$$\alpha = \alpha_o P_s^n \quad (12)$$

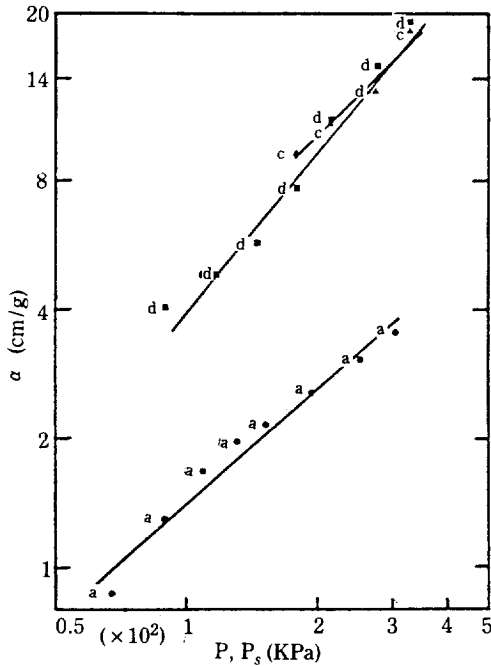


Fig. 7. Specific resistance variation in filter cake.

solid: CaCO_3 CaCO_3 Talc(II) Talc(II) Talc(I) Talc(I)
 pressure: P P_s P P_s P P_s

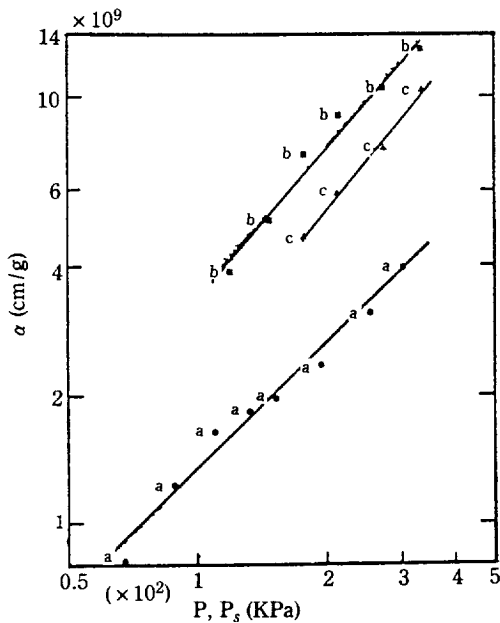


Fig. 8. Specific resistance variation with oialite.

solid: CaCO_3 CaCO_3 Talc(I) Talc(I) Talc(II) Talc(II)
 pressure: P P_s P P_s P P_s

본 연구의 실험조건에서 α_0 는 Table 1에서 보는 바와 같이 여과조제를 첨가하지 않은 경우 0.6-0.8 정도였으며 n 은 0.9-1.3 정도였다. 탄산칼슘, Talc(I) 및 Talc(II)의 고농도 슬러리에 다공성인 규조토를 2wt% 첨가한 경우의 국소여과 비저항 값은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 가해지는 압력의 증가에 따라 log-log 그래프에서 선형적으로 증가한 것은 규조토를 첨가하지 않은 슬러리의 경우와 유사하나, 국소여과 비저항 값의 현저한 감소를 가져왔다. 이는 슬러리에 다공성 입자를 첨가하여 만들어진 filter cake의 평균 공극률이 다공성 입자를 첨가하지 않은 경우의 filter cake의 공극률보다 증가하므로, filter cake 내부를 통과하는 물의 흐름에 대한 저항이 감소하기 때문이라고 볼 수 있다.

투수실험에서 filter cake 내부를 통과한 물의 양과 공극률로부터 filter cake 내부에서 물의 실제 속도 (interstitial velocity)를 식 (12)와 같이 얻을 수 있는데 [14],

$$U_{ii} = \frac{q}{A\epsilon} \quad (12)$$

cake 내부에서 물의 실제속도 U_{ii} 는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 filter cake에 가해지는 압력이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

고농도 슬러리에 규조토의 첨가는 규조토가 다공성이므로 filter cake 내부의 공극률을 증가시켜 주며, 따

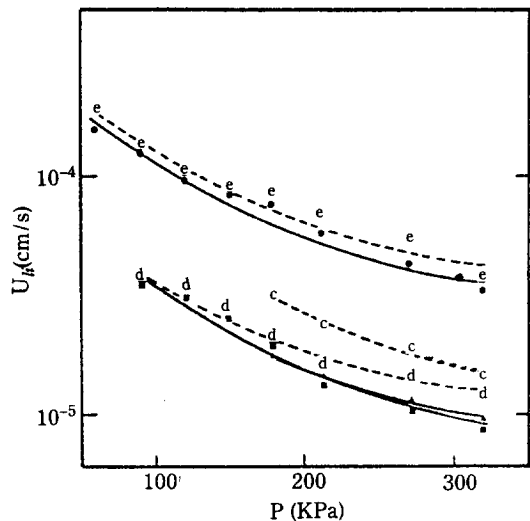


Fig. 9. Interstitial average liquid velocity in the filter cake.

solid: CaCO_3 CaCO_3 Talc(I) Talc(I) Talc(II) Talc(II)
 + Dialite + Dialite + Dialite

Table 1. 공극률 및 여과 비저항과 압력과의 상관식.

Solid	P (KPa)		P _s (KPa)	
CaCO ₃	$\epsilon = 0.868 P^{-0.0503}$	$\alpha = 0.826 \times 10^7 P^{1.1228}$	$\epsilon = 0.860 P_s^{-0.0494}$	$\alpha = 0.101 \times 10^8 P_s^{1.0996}$
Talc (I)	$\epsilon = 0.853 P^{-0.0563}$	$\alpha = 0.549 \times 10^8 P^{0.9967}$	$\epsilon = 0.849 P_s^{-0.0559}$	$\alpha = 0.609 \times 10^8 P_s^{0.9880}$
Talc (II)	$\epsilon = 0.929 P^{-0.0691}$	$\alpha = 0.110 \times 10^8 P^{1.2885}$	$\epsilon = 1.030 P_s^{-0.0892}$	$\alpha = 0.132 \times 10^8 P_s^{1.2669}$
CaCO ₃ + Dialite (2wt %)	$\epsilon = 0.845 P^{-0.0404}$	$\alpha = 1.669 \times 10^7 P^{0.9544}$	$\epsilon = 0.837 P_s^{-0.0390}$	$\alpha = 0.210 \times 10^8 P_s^{0.9230}$
Talc(I) + Dialite (2wt %)	$\epsilon = 1.178 P^{-0.1110}$	$\alpha = 0.669 \times 10^7 P^{1.2593}$	$\epsilon = 0.849 P_s^{-0.0560}$	$\alpha = 0.609 \times 10^8 P_s^{0.9880}$
Talc(II) + Dialite (2wt %)	$\epsilon = 1.204 P^{-0.1107}$	$\alpha = 0.153 \times 10^8 P^{1.1770}$	$\epsilon = 1.174 P_s^{-0.1075}$	$\alpha = 0.200 \times 10^8 P_s^{1.1423}$
Correlations Coefficient	0.89-0.93	0.90-0.94	0.90-0.95	0.89-0.95

라서 cake 내부에서의 물의 실제속도도 증가한다고 볼 수 있다.

탄산칼슘, Talc(I) 및 Talc(II)의 고농도 슬러리의 cake filtration에서 공극률 및 국소여과 비저항과 에너지 손실을 고려한 실제 cake에 가해진 압력 및 외부에서 가해진 압력들간의 상관성을 각각의 경우에 대하여 Table 1에 나타내었다.

5. 결 론

이상과 같은 실험결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고농도 슬러리의 cake filtration에서 cake의 공극률과 가해진 압력사이의 관계 및 국소여과 비저항과 압력사이의 관계는 각각 log-log 그래프에서 압력의 증가에 따라 선형적으로 감소 및 증가하였으며, cake 내부에서 통과하는 물의 실제속도는 압력의 증가에 따라 감소하였다.

2. 고농도 슬러리에 다공성 입자의 첨가는 filter cake 내부의 공극률을 효과적으로 증가시켜 국소여과 비저항의 감소를 가져오며, cake 내부를 통과하는 물의 속도를 증가시켜 여과되는 물의 양을 증가시킬 수 있다.

NOMENCLATURE

- A₁ : Cross sectional area of permeability gauge [cm²]
 A₂ : Cross sectional area of cylinder [cm²]
 C : Cohesive force between the cylinder and filter cake [g/cm²]
 D : diameter of cylinder [cm]

- f : friction factor between the cylinder and filter cake
 g : gravity acceleration [cm/sec²]
 h : height of permeability gauge [cm]
 k_o : Constant
 L : thickness of filter cake [cm]
 P_h : Pressure in the cylinder [KPa]
 P_o : horizon pressure in the cylinder [KPa]
 P_v : vertical pressure in the cylinder [KPa]
 q : permeability of fluid in the cylinder [cm/sec]
 u : permeability of fluid in the permeability gauge [cm/sec]
 W : weight of dry filter cake [g]
 z : distance from the cake surface [cm]
 Z : thickness of the compressed cake [cm]

Greek Letters

- ρ : density [g/cm³]
 θ : time [sec]
 μ : viscosity of liquid [g/cm·sec]
 α : specific local resistance [cm/g]
 ϵ : porosity of filter cake [—]

REFERENCES

- Carman, P.C.: Trans. Instn. Chem. Engrs. (London), **15**, 150 (1937).
- Carman, P.C.: Trans. Instn. Chem. Engrs. (London), **16**, 168 (1938).
- Ruth, B.F.: *Ind. Eng. Chem.*, **38**, 564 (1964).
- Ruth, B.F.: *Ind. Eng. Chem.*, **27**, 708 (1935).
- Grace, H.P.: *Chem. Eng. Progr.*, **49**, 303 (1953).
- Grace, H.P.: *Chem. Eng. Progr.*, **49**, 367 (1953).
- Tiller, F.M., Haynes, Jr.S. and Lu, W.M.: *AIChE J.*, **18**, 13 (1972).
- Tiller, F.M. and Shirato, M.: *AIChE J.*, **10**, 61

- (1964).
9. Ingmanson, W.L.: *Chem. Eng. Progr.*, **49**, 577 (1953).
 10. Kottwitz, F.A. and Boylan, D.R.: *AIChE J.*, **4**, 175 (1958).
 11. Shirato, M., Aragaki, T. and Iritani, E.: *J. Chem. Eng. Japan*, **13**, 61 (1980).
 12. Shirato, M., Iritani, E., Hayashi, N. and Ito, K.: *J. Chem. Eng. Japan*, **16**, 159 (1983).
 13. Shirato, M. and Iritani, E.: *Proc. PACHEC*, 83, Vol. 1, 106 (1983).
 14. Shirato, M., Sambuichi, M., Murase, T., Aragaki, T., Kobayashi K. and Iritani, E.: *J. Nagoya Univ., Japan* **37**(1), May (1985).
 15. Kikuchi, K.: *Proc. of Annual Meeting of KICChE*, April, (1985).
 16. Kikuchi, K.: *R&D Report of Showa Chem. Ind. Co. LTD.*, Japan, (1983).
 17. Culrer, R.H.: *Chem. Eng. Progr.*, **71**(12), 51 (1975).
 18. Smith, G.R.S.: *Chem. Eng. Progr.*, **71**(12), 37 (1975).
 19. Yoon, S.H.: *J. KICChE*, **5**(3), 171 (1967).
 20. Yoon, S.H.: *Korean J. Chem. Eng.*, **3**(1), (1986).
 21. Yoon, S.H.: *Proc. World Congress III of Chem. Eng.*, Tokyo 81-156, 121 (1986).
 22. Clyde, Orr.: *Filtration: Principles and Practices*, Marcel Dekker Inc., N.Y. (1977).