

## 현탁물 침강시 일어나는 현상

김 영 태

화 공 과

(1983. 4. 30접수)

### 〈요 약〉

현탁고체가 침강시 일어나는 여러가지 현상을 알아 보았다.

침강속도, 고형물의 침강조에서 농도의 변화 및 압력의 변화등을 측정하고 침전제 첨가의 영향도 규명하였다.

## The phenomena on the settling of the flocculated solid

Kim, Young Tae

Department of Chemical Engineering

(Received, April 30, 1983)

### 〈Abstract〉

This study was done to know the phenomena of sedimentation occurred in the suspension solution. The experimental analysis of the settling velocity, the variation of the solid concentration in the settling tank and the variation of the pressure caused by solid particles was studied.

### I. 서 론

침강농축 분리는 주로 고체입자를 액체로부터 분리시키는 것을 말한다.

액체와 고체입자의 혼합계는 입자의 크기에 따라 **솔(sol)**상태, **콜로이드(colloidal)**상태, **현탁(suspension)**상태로 나눌 수 있다.

그러므로 여기서는 공업적 규모인 현탁상태에 대해서 논하고자 한다.

입자의 응결과정에 따라서 **응결(coagulation)**과 **응집(flocculation)**으로 나눌 수 있다. 회박 현탁액에서는 입자의 자연적 응결현상을 연구했으며, 농축 현탁액에서는 현탁제를 첨가하고 교반하여 침강속도에 영향이 큰 압축압의 변화를 실험 하였다.

응집 현탁액(flocculated suspension)의 침강농축(sedimentation)은 자유침강(free settling), 방해침강(hindered settling)과 압착침강 (compre-

ssive settling)으로 나눌 수 있으며, 이 세가지 침강현상을 서로 비교했다.

응집반응(flocculation kinetics)에 대해서 일찍이 Smoluchowski는 정지상태의 입자간의 충돌에 의하여 생긴 응집현상을 입자간의 확산식으로서 설명했다.

응집제로서 무기 금속이온은 음전하를 띤 입자를 끌어당겨서 **floc**를 생성하는 것으로 해석되며 고분자 응집제는 입자에 응집제가 흡착되어 입자간이 가교를 형성하여 **floc**입자가 된다.

침강장치로서 농축기(thickener)와 정정기 clarifier)를 주로 사용하나 여러인자 그 중에도 응집화학(chemistry of flocculation), 응집반응속도, 응집입자의 침강현상, 입자의 밀도, 농도와 침강조의 수력학적 인자에 의하여 좌우된다.

회분농축(batch thickening)에서 고체의 농도, 고체입자의 종류 및 응결제 첨가 여부등에 따라서 침전시 고체입자는 침강조에서 전이층을 포함하여

여러층으로 분리되거나 혹은 현탁고체와 액체로서 두층을 이루는 경우가 있으나 본 논문에서는 후자의 경우만을 실험했다.

## II. 희박 현탁액의 침강

희박현탁액에서 현탁고형물(suspended solid)은 입자로서 되어있으며, 교반하면 입자간에 충돌하면서 응결현상이 일어나서 새로운 응집입자(floc)가 생성되기 때문에 충돌수는 floc의 응결속도와 관계가 크다.

$$J_{11} = \frac{4}{3} n_1 n_1 R_{11}^3 \frac{du}{dz} \quad (1)$$

$J_{11}$ 는 입자간의 충돌빈도이다.

기본입자(primary particle)가 성장하여 floc가 되는 반응에서 모든 floc가 구형으로 가정하고 밀도 및 기본입자의 크기가 같다면 응결생성속도는 다음과 같다.

$$\frac{n_1}{n_0} = \text{Exp}\left(-\frac{GC_f T}{\pi}\right) \quad (2)$$

희박현탁액에서 이와같이 생성된 floc가 discrete particle으로서 자유침강시 free terminal velocity을 나타내면

$$V_f = \left[ \frac{4}{3} \frac{Rg}{C_D} \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) d_f \right]^{1/2} \quad (3)$$

자유침강은 Stokes 영역에서 발생함으로 위식을 쓸 수 있다.

Drag 계수는 Reynold 수 및 구형도(sphericity)와 함수관계가 있으므로 floc의 구형도를 0.8로서 가정하면  $C_D = 45/Re$ 가 된다. 3식에 drag 계수값을 대입하면

$$V_f = \frac{20}{\mu} (\rho_f - \rho_w) d_f^2 \quad (4)$$

floc의 유효밀도(effective density)를  $\rho_e$ 로 하면  $\rho_e$ 는 floc의 밀도와 액체의 밀도의 차로서 이는 floc의 buoyant density라고 할 수 있다.

물질수리식을 floc와 고체입자에 대해서 구하면

$$\rho_f v_f = \rho_s v_s + \rho_w v_w \quad (5)$$

$v_f$ 는 floc의 전운속이여  $v_s$ 는 고체입자만의 용적으로서 이것을 floc의 지경 및 기본입자(primary particle)의 직경으로 나타내면 다음과 같다.

$$v_w = v_f - v_s = k_1 d_f^3 - i k_2 d_0^3 \quad (6)$$

여기서  $k_1, k_2$ 는 형상계수(shape coefficient)로서 상수이고  $i$ 는 floc내 존재하는 기본입자의 갯수이

다.

상기 (5)식을 (6)식에 대입하면

$$(\rho_w + \rho_s) k_1 d_f^3 = \rho_s i k_2 d_0^3 + \rho_w (k_1 d_f^3 - i k_2 d_0^3) \quad (7)$$

만일 형상계수가 구형이고 크기가 동일하면 다음과 같이 간단히 쓸수있다.

$$\rho_e = \frac{i(\rho_s - \rho_w)d}{\left(\frac{d_f^3}{d_0^3}\right)} \quad (8)$$

그러나 floc는 형상계수는 구형이 아니고 크기도 서로 같지 않으므로 다음과 같은 실험식을 구하였다.

$$\rho_e = \frac{a(\rho_s - \rho_w)}{\left(\frac{d_f^3}{d_0^3}\right)} \quad (9)$$

이 식은 floc의 직경과 유효밀도의 관계를 나타낸 식이다.

간섭침강(hindered settling)에 있어서는 침강속도와 공극도에 관해서 Richardson은 분체의 유동화(fluidization)식을 응용하여 floc의 침강속도를 다음과 같이 구했다.

$$V_f = \frac{g d_f (\rho_f - \rho)}{18\mu} \epsilon_f^{1.65} \quad (10)$$

위식은 Stokes 식을 수정하여 유도한 실험식으로 적은 Reynold 범위내에서 입자의 농도가 희박시에는 잘 적용된다.

## III. 고농도 현탁액의 침강

고농도 현탁액의 현탁물이 침강시 일어나는 압력 변화는 다음과 같다.

$$P_L + P_s = \frac{g}{g_c} (\rho_s - \rho) S \quad (11)$$

여기서 침강조의 기벽과 floc사이에 발생하는 마찰 손실을 무시한다면  $P_L$ 과  $P_s$ 의 합은 floc가 중력에 의하여 침강시 고체가 갖는 전압에 해당된다.

공극도와 고체압축압(solid compressive pressure)의 관계는 여러 사란에 의하여 여러가지 방법에 의하여 설명했으나, 먼저 Shin는 applied pressure가 대기압 보다 대단히 클 때 평형공극도(equilibrium voidage)로서 압축압과의 관계를 실험적으로 다음과 같이 유도하였다.

$$\epsilon^* = a P_s^b \quad (12)$$

여기서 a, b는 상수로서 물질의 종류에 따라 서로 다른 일정한 값을 갖는다고 설명 하였다.

Adorjan은 적용압력(applied pressure)가 대기압

압 일때 즉 적은 적용압력에서 고체의 compressive strength을 현탁고체의 solid volume fraction 으로서 실험식을 유도 하였다.

$$P_s = a \sinh b(C_s - c) \quad (13)$$

이 식에서  $a, b, c$ 는 상수로서 Adorjan은 silica powder을 시료로서 해서 현탁제로서 Magnafloc 455을 사용하여 compressive cell로서 어느 정도 적용 압력을 가하여 실험하였다. 그러므로 silica powder 같은 응집성이 적은 시료로서 실험치가  $CaCO_3$  같은 응집성이 큰 floc에는 적용하기 힘든 것을 발견 하였다.

본 실험에서는 앞서 말한 실험장치를 써서 얻은 실험자료를 최소자승법로서 전산처리한 결과 다음과 같은 실험식을 얻을 수 있었다.

$$\epsilon = a(P_s + b)^c \quad (14)$$

여기 이식에서  $a, b, c$ 는 상수로서 물질의 종류에 따라서 결정된다.

침강조에서 고농도 현탁물의 침강속도는 현탁고체에 대한 액체의 건보기 상대속도로서 바꾸어 쓸 수 있으므로 Darcy 식을 인용하면 다음과 같다.

$$V = -K_1 \frac{g_s(1-\epsilon)}{\mu} \cdot \frac{\partial P_L}{\partial S} \quad (15)$$

$K_1$ 는 Darcy의 투과계수(permeability coefficient)이며 이 투과계수를 수정투과계수로서 다시 쓰면

$$K = K_1 \frac{g_s(1-\epsilon)}{\mu} \quad (16)$$

Darcy의 투과계수는 공극도와와의 사이에는 다음의 관계로서 표시 된다.

$$\log K_1 = a\epsilon + b \quad (17)$$

(7)식과 (5)식을 대입한후 미분하면

$$\frac{\partial V}{\partial S} = -K \frac{\partial^2 P_L}{\partial S^2} - \left( \frac{dK}{dP_s} \right) \left( \frac{\partial P_s}{\partial S} \right) \left( \frac{\partial P_L}{\partial S} \right) \quad (18)$$

공극도의 공극율의 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{e}{1+e} \quad (19)$$

8식과 9식의 미분항을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial t} = -K \left( \frac{dP_s}{de} \right) \left( \frac{\partial^2 P_L}{\partial S^2} \right) + \left( \frac{dK}{de} \right) \left\{ \left( \frac{\partial P_L}{\partial S} \right)^2 - \frac{g_s}{g_c} (\rho_s - \rho) \left( \frac{\partial P_L}{\partial S} \right) \right\} \quad (20)$$

위식을 풀기 위하여 무차원식으로 다시 쓰면

$$T \equiv t/S_0^2$$

$$P \equiv P_L/S_0 \{ (\rho_s - \rho) g/g_c \}$$

$$N \equiv -K(dP_s/de)$$

$$H \equiv (dK/de)S_0(\rho_s - \rho)g/g_c$$

$$L \equiv S/S_0$$

그리고  $M$ 은 시간이 무한대일때의  $N$  값이다. 상기 식을 대입하면

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \left( \frac{N}{M} \right) \left( \frac{\partial^2 P}{\partial L^2} \right) - \left( \frac{H}{M} \right) \left\{ \left( \frac{\partial P}{\partial L} \right)^2 - \frac{\partial P}{\partial L} \right\} \quad (21)$$

위식을 수치해석으로 풀기 위하여 sediments의 높이  $n$ 개의 solid volume 으로서 분할하면 다음과 같이 바꾸어 쓸수 있다.

첫째 침강조의 윗면의  $P$ 를  $P_0$ 로 놓으면

$$\textcircled{a} \quad i=0 \quad P_0=0 \quad (22)$$

$$\textcircled{b} \quad i=1 \sim n-1$$

$$\frac{dP_i}{dT} = n^2 \left( \frac{N_i}{M} \right) (P_{i+1} - 2P_i + P_{i-1}) + \left( \frac{H_i}{M} \right) \left\{ \frac{n^2}{4} (P_{i+1} - P_{i-1})^2 - \frac{n}{2} (P_{i+1} - P_{i-1}) \right\} \quad (23)$$

$$\textcircled{c} \quad i=n \quad \left( \frac{dP_n}{dT} \right) = 2n^2 \left( \frac{N_n}{M} \right) (P_{n-1} - P_n) \quad (24)$$

위의 세 식은 연립 미분방정식으로 Runge-Kutta-Gil 법으로 전산기에 의하여 풀수 있었다.

여기서 구한 치를 무차원식과 Darcy 식에 의하여 잉여유체압(excess hydraulic pressure) 및 고체 압축일증을 계산할 수 있었다.

#### IV. 실험장치 및 방법

침강조(settling column)는 아크릴원통으로서 크기는 직경이 9cm이고 길이가 약 120cm이다. 관저에는 교반용 및 시료를 주로서 되어있으며 질소를 주입시켜서 시료의 혼합을 위해 위치한 교반기와 동시에 하도록 되어 있다. Flocc는 생성 및 성장을 균일 크기로서 유지하는데는 교반의 영향이 크므로 주의할 요하고 이것은 flocc의 공극도에 영향을 미친다.

관벽에는 백금촉을 도금한 백금전극을 적당거리 에 부착시켰고, 또한 압력을 측정하기 위하여 관에 직경 1mm 정도의 구멍을 뚫고 solenoid valve를 달

아서 각 밸브를 relay-switch 을 연결하여 시간마다 동시에 전도도와 압력을 측정하도록 장치되어 있다.

현탁액은 현탁범프로 침강조에 주입한후 위에서 응집제를 식량 주입하면서 교반한다. 응집제에 의한 전도도의 영향을 감소시키기 위하여 고체응집제는 사용하지 않았으며 CFA 50 같은 거의 전도도에 영향을 주지 않는 고분자 응집제만을 사용했다. 고분자응집제에 의한 현탁액에 대한 침강속도 및 공극도에 의한 영향을 측정하기 위하여 capillary suction time 을 측정하였다. 이는 응집액을 통해서 액체가 확산할 때 이를 공극도의 정도에 따라 전도도에 의하여 간접으로 측정 할 수 있다.

전극의 공시험(blank test)을 위하여 시약용 열화 가리를 정확히 농도를 맞춰서 준비한 후 전극상수 (cell constant)를 온도에 대해서 측정하여 동시에 온도보정계수도 정하였다. 전극의 크기는 1cm×1cm 의 백금판으로 한쌍의 전극의 상대적위치 및 판의 geometry 가 다르므로 보정이 필요하다.

또한 증류수로써 각 전극상에서 비전도도를 측정하여 열화加里 용액에 의한 기지의 비전도와 비교하여 전극상수를 다시 보정하여 사용한다.

압력은 solenoid valve 에서 판을 통해서 압력변환기 (pressure transducer)에 전달된다.

압력변환기는 Fig.1에서 보는 바와 같이 특별히 적은 압력을 감지할 수 있도록 제작한 것이다. 시료에 의하여 압력이 발생하면 다공판에 전해지고 다음에 기공을 통해서 고무막에 전해지고 고무막과 aneroid 막 사이에는 silicone oil로서 밀봉되어 있다. Silicone oil에 의하여 aneroid 막에 전달된 압력에 따라 감지봉 (sensing bar)이 움직이므로 이를 solenoid 가 감지봉의 변위(displacement)에 따라 Statham 계기에 전달 측정하게 되어 있다.

Solenoid 판은 O-ring 을 틀어서 이동시키면서 영점 조정을 하도록 제작하였다.

시료로서는 주로 탄산칼슘을 사용하였고 kaolin, bentonite 등도 사용하였다.

탄산칼슘은 염기성이고 용해성분이 있으므로 일주일 동안 증류수로써 정치시킨 후 증류수로 다시 세척하여 pH를 중성이 되도록 중회시킨 후 시료로서 사용하였다. 시료의 입자분포도는 Coulter Counter 로써 측정하고 비중은 비중병으로 측정하였다.

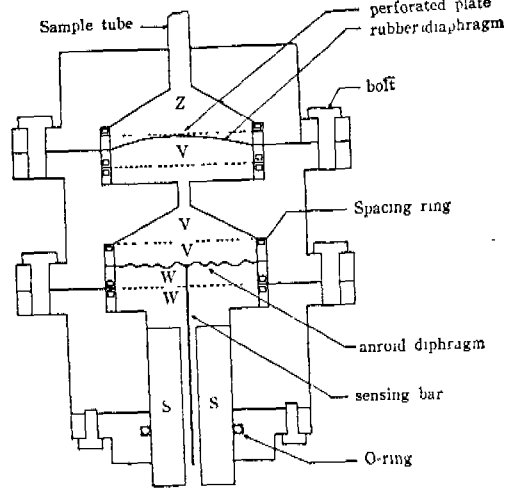


Fig. 1

## V. 결과 및 검토

회박 현탁액에서 고체의 침강속도는 고체입자가 모여서 discrete floc particle 이 되므로 floc 개개의 침전속도가 중요하다.

그러므로 floc 의 (9)식에서 보는 바와 같이 buoyant density 와 floc 의 직경을 Fig.2에서 CST 에 따라 표시하였다.

같은 floc 직경에서 CST 에 따라서 floc 의 유효 밀도가 틀리는 것은 응결제의 첨가농도에 따라서 응집상태가 다르기 때문이다. 또한 회박현탁액의 고체의 침강은 간섭침강시에는 (10)식에서 보는 바와 같이 주로 floc 의 공극도와 floc 의 density 에 의하여 최종속도가 결정된다. 이는 Kynch 의 이론과 같이 주로 고체입자의 농도에 따라 침강속도가 결정됨을 알 수 있다. 그러나 고체입자가 15%(중량)일 때는 압축 침강이 일어나서 종래의 Stokes 식이나 Darcy 식으로 해석되지 않고 floc 의 입축변위에 따라서 침강속도가 결정된다.

고농도 현탁액에서 침강시 각침강 높이에서 시간 변화에 따라 농도변화를 알기 위하여 침강실험을 한 결과 Fig. 3에서는 500g의 CaCO<sub>3</sub>을 시료로서 초농도가 0.79g/cm<sup>3</sup> 로써 침강조에 걸쳐서 일정하게 한 다음 침강선 높이를 100cm 로써 표준으로 하

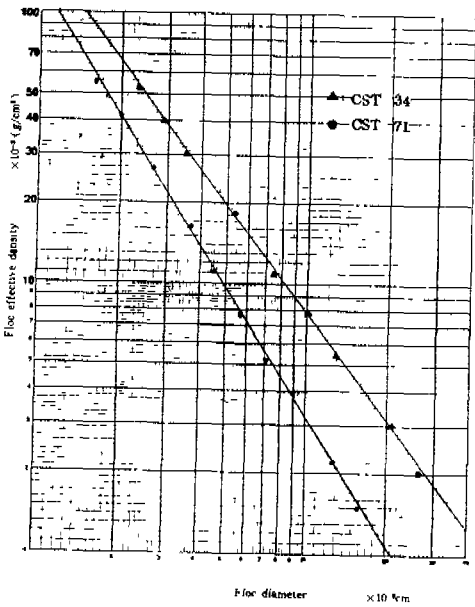


Fig. 2

고 시간마다 전도도로서 고체의 농도를 각지점에서 측정 한 것이다. 최종시간은 침강후 24 시간 지난 다음을 무한 침강시간으로 정하여 침강선 높이와 농도를 측정 한 것이다.

Fig. 4는 같은 조건에서 응집제로서 CFA 50을 50ppm 첨가한 후 실험한 결과다.

Fig. 3과는 달리 침강속도가 대단히 빨라서 5분후 침강선은 거의 0.77에 달한다. 무한 침강시간후의 침강선 높이는 Fig. 3 과 비교해서 약간 높은 것은 floc의 내부구조의 영향으로 floc의 공극도가 커진 것이며 동시에 압축압이 낮은 것으로 생각된다.

Fig. 5은 고농도 전압력식에 의하여 20%(중량) 및 10%(중량)의 현탁 고형물의 농도일 때 높이비 (height ratio)와 전압을 나타낸 것이다. 이 그림에서 초기시간에서 전압은 응결제 첨가 여부에 영향을 받지 않고 단지 floc의 buoyant density 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 각 위치에서 공극도와 고체 압축압을 나타낸 것이다. 이 결과는 20%(중량)의 CaCO<sub>3</sub>

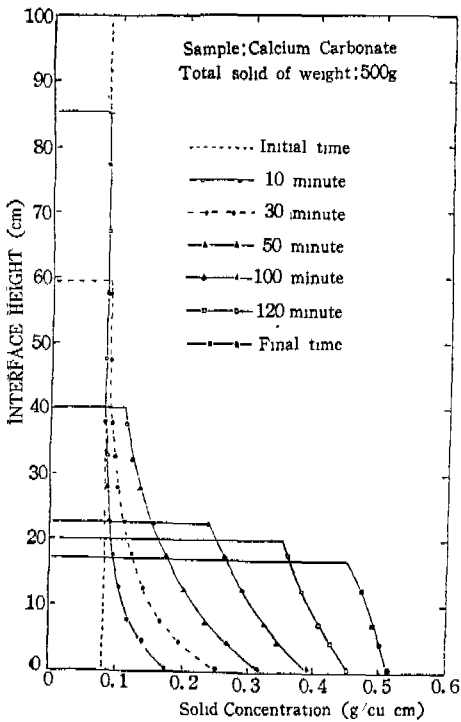


Fig. 3

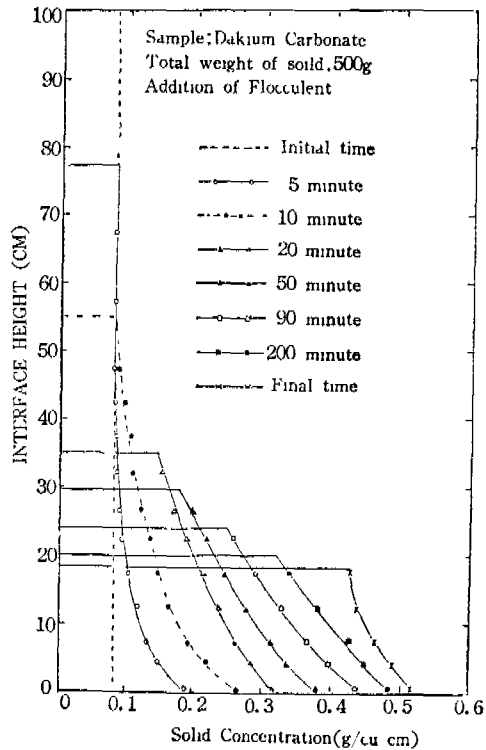


Fig. 4

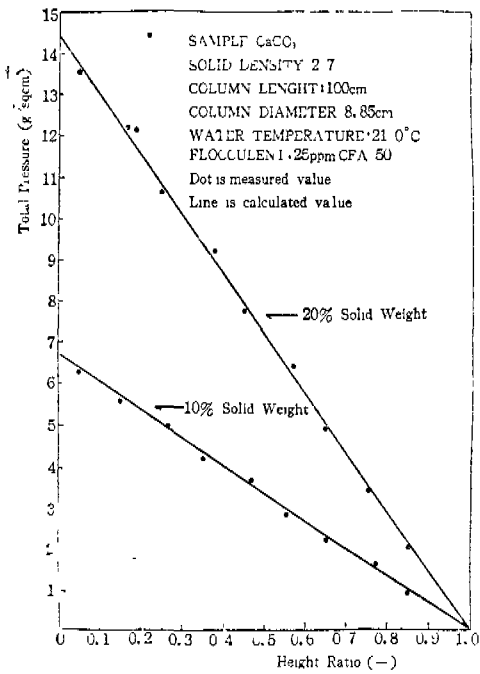


Fig. 5

로서 시료를 사용했으며 계산치와 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 위의 조건에서 시간에 따른 excess liquid pressure 을 나타낸 것이다. 이것은 전산기로서 처리한 값이다. 압축압과 공극도의 관계식에서 CaCO<sub>3</sub>의 농도가 20%(중량)일때는 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.8685(P_s + 0.0147)^{-0.0124}$$

이 값은 응결계를 침가하지 않은 상태이고 응결제를 침가하면 새로운 관계식을 얻을 수 있으며 15%(중량)이상의 floc에서는 잘 적용되나 낮은 농도

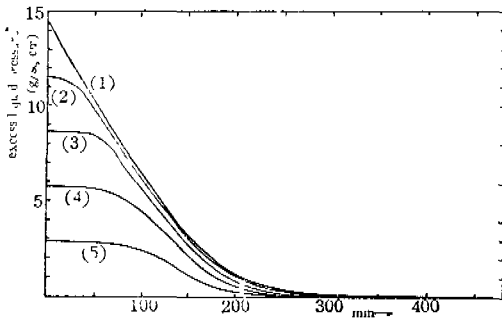


Fig. 7

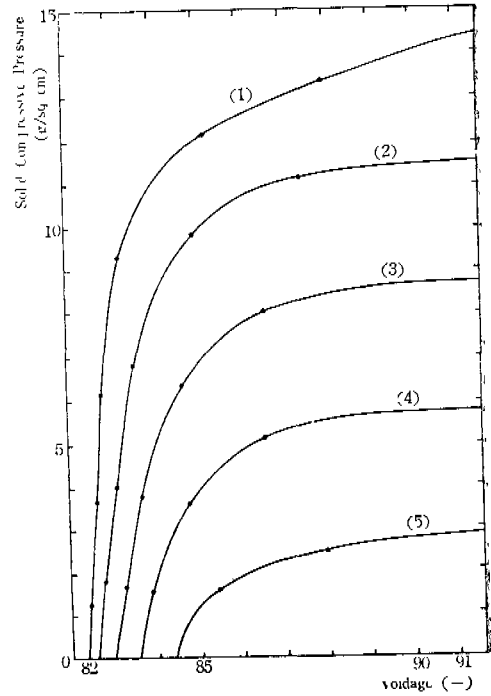


Fig. 6

에서는 적용되지 않는다.

### Ⅶ. 결 론

회분 침강도에서 현탁물의 침강속도는 현탁고체의 농도가 15%(중량)인때는 간섭침강에 의하여 floc의 밀도 및 공극도 다시 말하면 floc내의 단위 부피당 고체입자의 수에 따라서 침강속도가 결정되거나 고농도의 현탁물이 침강시에는 고체의 농도가 침강에 영향을 미칠 뿐 아니라 floc 자체가 갖는 압축압에 의하여 침강 속도가 달라진다. 압축압은 floc의 공극율의 시간당 변화물 주며 이는 침강시 일어나는 압착(consolidation)에 의한 투과계수 변화를 가져온다.

또한 공극도는 전기전도도로서 측정하여 침강조 내에서 농도분포를 알 수 있고 또한 침강하는 동안 일어나는 excess liquid pressure 변화를 고농도에서는 쉽게 측정할 수 있다.

감 사

이 논문은 문교부 대학 배정 학술연구비에 의하여 수행되었으며 문교부 당국에 감사 드립니다.

Nomenclature

- $C_D$ : drag coefficient
- $C_f$ : floc volume fraction
- $C_s$ : solid volume fraction
- $d_f$ : diameter of flocs(cm)
- $d_0$ : diameter of original particles(cm)
- $e$ : void ratio(-)
- $G$ : flocculation velocity gradient(sec<sup>-1</sup>)
- $g$ : gravitational acceleration(cm/sq sec)
- $g_0$ : gravitational acceleration constant (dyne/g-force)
- $J_{ij}$ : collision frequency(-)
- $K$ : modified permeability coefficient(sq cm)
- $K_1$ : permeability coefficient(sq cm)
- $k_i$ : shape coefficient(-)
- $i$ : number of particles(-)
- $n_i$ : number of  $i$  th particles(-)
- $n_0$ : flocs concentration at initial time
- $n_t$ : flocs concentration after time  $t$
- $P_s$ : hydraulic excess pressure(gr-f/sq cm)
- $P_L$ : liquid pressure(gr-f/sq cm)
- $P_c$ : compressive pressure(gr-f/sq cm)
- $R_s$ : Reynold number(-)
- $R_{ij}$ : interaction radius of colliding particles.
- $S$ : solid volume per unit area(cm)
- $S_0$ : total solid volume per unit area(cm)
- $T$ : interaction time
- $V$ : velocity of liquid flow(cm/sec)
- $V_t$ : terminal velocity(cm/sec)
- $v_f$ : volume of flocs(cu cm)
- $v_s$ : volume of solid(cu cm)
- $v_w$ : volume of water(cu cm)
- $\epsilon$ : local voidage(-)
- $\epsilon^*$ : equilibrium voidage(-)
- $\epsilon_f$ : flocs voidage(-)
- $\mu$ : viscosity of liquid(gr/cm sq sec)

- $\rho_f$ : density of flocs(gr/cu cm)
- $\rho_s$ : density of solid(gr/cu cm)
- $\rho_w$ : density of water(gr/cu cm)

참 고 문 헌

Kynch, G. J. 'A Theory of Sedimentation.' Trans. Faraday Soc. 48 : 166-176. (1952)

Michaels, A. S., and Bolger, J. C. 1962A. 'Settling Rates and Sediment Volumes of Flocculated Kaolin Suspensions'. Ind. Eng. Chem. Fund. 1 : 24-33.

Fitch, E. B., 'The Significance of Detention in Sedimentation', Sewage & Industrial Wastes, 29(10), 1123(Oct. 1957).

Adorjan, L. A., 'Theory of Sediment Compression', Proc. XI INT. Min. Proc. Congr., Cagliari, Paper 11(1975).

Camp, I. R., 'Flocculation and Flocculation Basins', ASCE Trans, 120, 1(1975).

Coe, H. S. and Clevenger, G. H. 'Methods for Determining Capacities of Slime Settling Tanks', Trans. Am. Inst. of Mining Eng. 55 : 356-384. (1916)

Dick, F. I., 'Thickening Characteristics of Activated Sludge', In Advances in Water Pollution Research (1970).

Scott, K. J., 'Solids-settling Zones Observed in Continuous Thickeners and Their Bearing on Automatic Control,' Proc. 1st Intern. Conf. on Particle Technology, Illinois Inst. Technology, 17(1973).

Shannon, P. T., E. Stroupe, and E. M. Tory, 'Batch and Continuous Thickening': I & E. C. Fund., 2, 203(1963).

Shin, B. S. and R. I. Dick, 'Effect of Permeability and Compressibility of Flocculent Suspensions on Thickening'. Proc. 7th Internat. Conf. Water Pollution Research, Pergamon Press, Ltd. (1974).

Shirato, M., H. Kato. K. Kobayashi, and H. Sekazaki. 'Analysis of Settling of Thick Slurries due to Consolidation', J. Chem. Eng.

- Japan. 3, 98(1970).
- Smoluchowski. M., 'Versuch Einer Mathematischen Theorie Der Koagulations Kinetic Kolloider Losungen', Physik, 2, 17, 585 (1916).
- Dixon, D.C., P. Souter, and J.E. Buchanan, 'A Study of Inertial Effects in Sedimentation,' Chem. Eng. Sci. Vol. 31, 737(1976).
- Gaudin, A.M., Fuerstenau, M.C., and Mitchell, S.R., 'Effect of Pulp Depth and Initial Pulp Density in Batch Thickening'. Mining Eng.11(1959)
- Richard J.F. and W.N. Zaki, 'The Sedimentation and Fluidization', Trans. Inst Chem. Eng. Vol.1(12) 1954.