

## 서스펜션 중에서 입자의 형태와 크기가 침강특성에 미치는 영향

이 기 중

전주우석대학교 화학과

### The Effect of Particle Shape and Size on the Settling Characteristics in Suspension

Lee, Ki-Jong

Dept. of Chemistry, Chonju Woosuk University

초 록 비구형 입자들의 크기와 형태에 따른 침강 특성의 영향을 검토하였다. 비구형입자를 포함하는 서스펜션의 침강에서  $\log \mu_c$  대  $\log \epsilon$ 로부터 얻은 기울기 지표  $n$  값은 형태와 크기가 다른 입자는 같은 부피 농도에서 흡착되는 유체량이 달라져 입자크기가 감소하거나 불균일한 경우 증가하는 경향을 나타내었다. 실험결과 비구형입자를 포함하는 서스펜션의 침강에서 기울기 지표  $n_i$  값에 대하여  $n_i = n(a + b/d_v)$  와 같은 식을 얻었으며 이때  $a, b$ 는 입자형태에 따른 상수이며

**Abstract** The effect of particle shape and size on the settling characteristics in monodisperse suspensions of non-spherical particles was investigated. The slope index  $n$  values which was obtained from the plot of logarithm of settling rate vs. voidage were increased with the decrease of particle size because different amount of liquid could be adsorbed on irregular particle shape and/or size at same volume concentration. From the experimental results, an equation,  $n_i = n(a + b/d_v)$  where  $n$  is value of spherical particles,  $d_v$  is minimum particle diameter and  $a, b$  are constants for characteristic of particles.

### 1. 서 론

서스펜션의 중력침강에 의한 분리공정은 산업폐액중의 고체입자의 회수나 제거, 원료나 제품의 정제 가스중, 상하수도의 처리, 연소가스중 먼지의 제거, 광물의 분리정제등 화학공업에서 뿐만 아니라 여러 산업분야에서 널리 이용되고 있다. 따라서 유체와 고체입자간의 상대운동을 하는 계에 대한 기본특성을 이해할 필요성이 점차 높아졌다.

1851년 Stokes<sup>1)</sup>에 의해 점성유체중에서 이동 물체에 작용하는 힘에 대한 중요한 이론적 연구결과를 발표된 후, 밀도와 크기가 같은 균일한 구형입자들만을 포함하는 서스펜션의 침강속도에 미치는 영향에 대해 많은 여러 연구가 수행되어 왔으며<sup>1~2)</sup>, 특히 크기가 다른 2종의 입자들로 된 서스펜션의 침강에 대하여도 Smith등에 의해<sup>11, 14~16)</sup> 실험식들이 제시되어 있지만 비구형입자의 서스펜션에서 유체의 일부가 입자들에 동반되어 이동할때의 유체가 서스펜션의 점도 및 침강속도에 미치는

영향등에 대한 연구는 적다.

본 연구에서는 미세입자로 된 서스펜션에서 고찰되어야 할 응집이나 응결이 거의 없는 여러모양의 굵은 입자들로 된 서스펜션에서 입자들이 이동할때 입자의 불규칙한 표면에 동반되는 유체로 인한 입자들의 유체역학적 부피의 증가와 밀도의 감소가 침강속도에 미치는 영향을 검토하였다.

### 2. 이론적 고찰

밀도  $\rho_s$ 를 갖는 유체에서는 변동된 유체의 무게와  $V\rho$ 와 같은 부력  $V\rho g$ 가 중력과 반대 방향으로 작용하게 되고, 침강속도라 불리는 일정속도  $\mu$ 로 물질이 떨어지는 어느값까지 낙하속도는 증가하게 된다.

Stokes<sup>1)</sup>는 무한양의 유체에서 균일구형입자의 운동에 작용하는 점성저항에 대한 다음식을 얻었다.

$$F = 3\pi \mu u d \quad (1)$$

여기서  $\mu$ 는 유체점도,  $u$ 와  $d$ 는 각각 고체

입자의 침강속도와 지름이며  $F$ 는 마찰계수이다. 또한 유체중에서 입자의 종착침강속도는  $u_0$ 점성저항과 균형을 이룰때의 속도이므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$3\pi\mu u_0 d = \frac{\pi d^3}{6}(\rho_s - \rho)g$$

$$u_0 = \frac{d^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu} \quad (2)$$

여기서  $\rho_s$ 는 입자의 밀도이고,  $\rho$ 는 유체의 밀도이다.

Steinour<sup>3)</sup>는 균일한 입자로 된 서스펜션의 침강에 대한 농도의 영향을 서스펜션의 밀도, 유체의 점도 및 공극율  $\epsilon$ 의 함수로 예견하여 다음 식을 제시하였다.

$$u_c = \frac{d^2(\rho_s - \rho_c)}{18\mu} f(\epsilon) \quad (3)$$

여기서  $u_c$ 는 서스펜션중에서 입자의 침강속도이고,  $\rho_c$ 는 서스펜션의 밀도이다. 아울러 서스펜션중에서 기벽에 대한 입자의 침강속도  $u_c$ 와 입자의 유체에 대한 상대적 관계를 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$u_p = u_c + u_c \frac{1-\epsilon}{\epsilon} = u_c/\epsilon \quad (4)$$

Hawksley<sup>4)</sup>는 농도가 큰 서스펜션에서 고체 입자의 유체에 대한 상대적 침강속도는 점도  $\mu_c$ , 밀도  $\rho_c$ 인 서스펜션에서 Stokes법칙의 속도와 같다고 예견하여 다음과 같은 관계식을 제안하였다.

$$u_p = \frac{u_c}{\epsilon} = \frac{d^2(\rho_s - \rho_c)g}{\mu_c} \quad (5)$$

이상에서 Steinour 및 Hawksley는 입자들에 작용하는 유효부력은 서스펜션의 밀도에 의존한다고 추정하였다.

### 2-1. 구형입자를 포함하는 서스펜션

Richardson등은 균일하고 굵은 단일종 구형 입자로 된 서스펜션에 대한 여러 실험결과  $\log u_c$ 과  $\log \epsilon$ 가 다음식과 같이 선형계를 나타냄을 알았다.

$$\log u_c = \log u_i + n \log \epsilon \quad (6)$$

$$\frac{u_c}{u_i} = \epsilon^n = (1-c)^n \quad (7)$$

여기서  $n$ 은  $\log u_c$ 대  $\log \epsilon$ 선의 기울기 지표이고,  $u_i$ 는 침전관중에서 무한히 희석하였을 때

의 침강속도이다. 또한  $u_0$ 와  $u_i$ 는 같았으므로 식 (6)의  $u_i$ 를  $u_0$ 로 대치하면 다음 계산식을 얻을 수 있다.

$$\frac{u_c}{u_0} = \epsilon^n = (1-c)^n \quad (8)$$

$$\frac{u_p}{u_0} = \epsilon^{n-1} = (1-c)^{n-1} \quad (9)$$

이상의 식 (8) 및 (9)는 균일한 균일종 입자들을 포함하는 침강속도에 대하여 입자들의 전체부피농도  $C$  또는 공극율  $\epsilon$ (입자들이 차지하지 않는 액간)의 극치로써 이미 제시된 가장 간단한 식들이다. Richardson의 실험결과에 따르면 구형입자에 대한  $n$ 값은 다음 식들로 주어진다.

$$0 < R\epsilon_0 < 0.2 \quad n = 4.65 + 19.5d/dt \quad (10)$$

$$0.2 < R\epsilon_0 < 1 \quad n = (4.45 + 17.5d/dt)R\epsilon_0^{-0.03} \quad (11)$$

$$1 < R\epsilon_0 < 200 \quad n = (4.45 + 18d/dt)R\epsilon_0^{-0.03} \quad (12)$$

$$200 < R\epsilon_0 < 500 \quad n = 4.45R\epsilon_0^{-0.1} \quad (13)$$

$$500 < R\epsilon_0 \quad n = 2.39 \quad (14)$$

여기서,  $R\epsilon_0$ 는 종착침강속도에서 수정 Reynold값이고,  $d_i$ 는 침전관의 지름이다. 위식에 의하면  $R\epsilon_0$ 가 200이상일 때에는 용기벽 효과는 고려하지 않아도 된다.

### 2-2. 비구형(각형)입자를 포함하는 서스펜션

Steinour<sup>3)</sup>는 비구형입자의 침강속도에 미치는 영향은 비구형입자들에 의하여 동반되는 유체량에 의한 것이며 그 양은 입자의 모양에 따라 결정되는 것으로 생각하였고, Ward 및 Whitmore<sup>13)</sup>의 실험에서는 입자표면에 동반되는 유체층은 표면적에 비례함을 보여주었다. 또한 이들 실험결과에 의하면 비구형입자의 서스펜션에서는 어느 주어진 부피농도에서 입자크기의 감소에 따른 상대침강속도는 다른 조건의 구형입자의 서스펜션에서의 상대침강속도에 비하여 더욱 감소함을 보여 주었다.

## 3. 실험

### 3-1. 시료 및 실험장치

본 실험에서는 서스펜션 조제용 고체입자로 한남화학(주)의 polystyrene입자, 한주(주)제의 소금결정, 한국파인세라믹스(주)제의 silicate입자 및 Patters Industries Inc.의 glass beads를 표준체로 체분리한 후 벤젠 또는 증류수로 세척

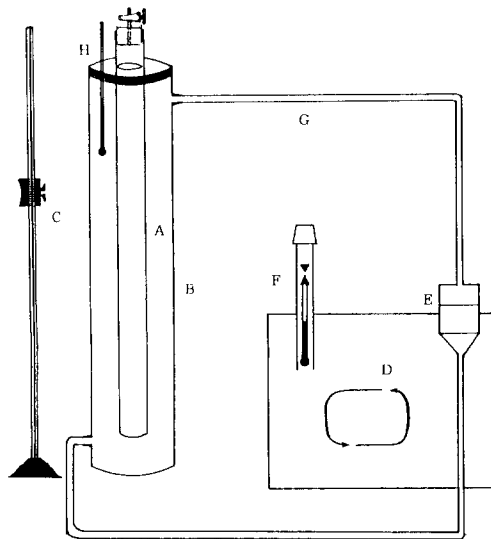
하여 사용하였다.

액체로는 글리세린, 에탄올 및 증류수를 측정하기에 적합한 점도와 밀도를 고려하여 혼합사용하였다. 실험에 사용된 고체입자 및 혼합액체의 물리적특성은 Table 1에서와 같다. 실험장치로는 주로 지름 42mm, 길이가

800mm인 침전관을 사용하여 그림 1에서와 같이 측정하였으며 이때 용기벽효과를 검토하기 위하여 2종의 시료에 대해서는 지름을 27mm 및 12.5mm로 바꾸어 지름 42mm에서와 같은 실험을 반복하였다. 시료의 점도측정에는 Rion viscometer(T-03)를, 밀도측정에는

Table 1. Physical Properties of Solid and Liquid.

Run series	Solid Particles				liquid		
	Material	Shape	Particle Size (mm)	$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	Material	$\mu (10^{-3}\text{pas})$ (at20°C)	$\rho(\text{kg/m}^3)$
1-1	Polystyrene	spherical	0.210~0.250	1045	ethanol -water	2.84	937
1-2			0.297~0.350	1045			
1-3			0.420~0.500	1045			
1-4			0.500~0.590	1045			
2-1	Silicate	irregular	0.149~0.177	2635	glycerine -water	22.42	1187
2-2			0.210~0.250	2635			
2-3			0.297~0.350	2635			
2-4			0.420~0.500	2635			
3-1	Salt crystal	cubic	0.210~0.250	2298	glycerine -water -salt (saturated)	30.20	1459
3-2			0.297~0.350	2298			
3-3			0.420~0.500	2298			
3-4			0.500~0.590	2298			
4-1	Glass bead	sphere	0.420~0.500		glycerine -water	22.41	1181



A : sedimentation tube      B : water jacket  
C : filar eyepiece and scale      D : water bath  
E : circulation pump      F : thermoregulator  
G : rubber tube      H : thermometer

Fig. 1. Schematic diagram of the sedimentation equipment.

Jolly's spring balance를 사용하였다.

### 3-2. 측정방법

서스펜션조제는 먼저 침전관에 표 2에 혼합비차율에 따른 적당량의 고체입자들을 먼저 넣은 다음 표 1 및 표 2에서의 해당 혼합액체를 필요한 양만큼 부어 넣었고 실험직전에 약 5분동안 침전관을 거꾸로 세우고 바로 세우기를 반복하여 균일하게 혼합하였다. 침강속도는 일정속도를 유지하기에 충분한 침강경계면이 4~5cm 정도 침강한 후부터 측정하였고, 실험값에 의하여 침강거리와 시간사이의 관계가 직선상을 나타내지 않는 것은 불균일하게 혼합된 것으로 보고 폐기하였다. 적어도 2회 이상을 실험을 행하여 그 결과를 선형을 이루면서 오차를 나타내지 않는 경우만을 실험값으로 택하였다. 또 서스펜션은 장치에 부착된 순환식 욕조중에서  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 를 유지시켰다.

Table 2. Mixing Ratio of Solid Particles in Suspension.

Run series	Material	Volumetric concentration(vol%)				
		1	2	3	4	5
1-1	Polystyrene	10	15	20	25	30
1-2		10	15	20	25	30
1-3		10	15	20	25	30
1-4		10	15	20	25	30
2-1	Silicate	10	15	20	25	30
2-2		10	15	20	25	30
2-3		10	15	20	25	30
2-4		10	15	20	25	30
3-1	Salt crystal	10	15	20	25	30
3-2		10	15	20	25	30
3-3		10	15	20	25	30
3-4		10	15	20	25	30
4-1	Glass bead	10	15	20	25	30

#### 4. 결과 및 고찰

단일종구형입자를 포함하는 서스펜션에 대하여 Richardson등은 다음과 같은 실험식을 제안하였다.

$$\frac{u_c}{u_0} = \epsilon^n = (1-c)^n \quad (8)$$

$$n = 4.65 + 19.5d/dt \quad (10)$$

본 실험에서는 표 1에서와 같은 13종의 서스펜션에 대하여 고체입자의 부피농도를 표 2에서와 같이 변화시키면서 입자형태 및 크기의 변화에 따른 유체역학적부피가 침강속도 및 기울기 지표에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 또한 glass beads와 silicate입자를 포함하는 2종의 서스펜션에 대하여는 Richardson 및 Zaki식의 기울기 지표값에 미치는 기백효과를 검토하기 위하여 침전관의 지름을 27mm 및 12.5mm로 바꾸어 지름 42mm에서와 같은 실험을 반복하였다.

표 3에 표 1에서와 같은 입자의 형태와 크기가 다른 13종의 입자를 포함하는 서스펜션에서 입자부피농도 변화에 따른 침강속도에 대한 실험값을 나타내었다. 아울러 그림 2, 3, 4는 이들 실험값에 대한  $\log u_c$  대  $\log \epsilon$  사이의 관계를 도사한 것이고  $n$ 값은 이들 그림에서 그 기울기에 의하여 얻어지는데, 이들 서스펜션에 대한 각각의  $n_i$ (비구형입자의 기울기 지표는  $n_i$ 로 표시)값은 표 4에서와 같다. 표 4

Table 3. Settling Rate of Particles in suspension.

	Settling Rate of Particles( $10^{-3}m/s$ )				
	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
1-1	0.542	0.408	0.303	0.220	0.156
1-2	1.091	0.825	0.615	0.449	0.319
1-3	2.195	1.662	1.245	0.915	0.647
1-4	3.115	2.365	1.772	1.295	0.928
2-1	0.421	0.302	0.209	0.141	0.096
2-2	0.855	0.622	0.440	0.307	0.210
2-3	1.745	1.279	0.913	0.640	0.442
2-4	3.520	2.596	1.875	1.317	0.910
3-1	0.363	0.265	0.192	0.131	0.088
3-2	0.741	0.548	0.394	0.272	0.184
3-3	1.501	1.112	0.815	0.581	0.388
3-4	2.188	1.588	1.184	0.819	0.564
4-1	3.320	2.540	1.898	1.395	1.005

는 위에서 언급한 13종의 각 서스펜션에 있어서 입자들의 최소지름( $d_v$ )의 역수인  $1/d_v$ 와 침강에 있어서  $\log u_c$  대  $\log \epsilon$  선의 기울기 지표  $n_i$ (또는  $n$ ) 및 이들  $n_i$  대  $n$  사이의 비( $n_i/n$ )인 유체역학적 부피인자  $K$  사이의 관계를 나타낸 것이다. 식 (9)의 Richardson 및 Zaki식에서는 입자지름이 작아질수록  $n$  값이 감소되는데, 그림 2, 3, 4 및 표 4의 결과에서와 같이 서스펜션에서는 입자지름이 작아질수록  $n$  값은 증가된다는 것을 알 수 있었다.

이상의 실험결과에서 비구형입자를 포함하는 서스펜션에서 부피농도가 같을 때는 입자

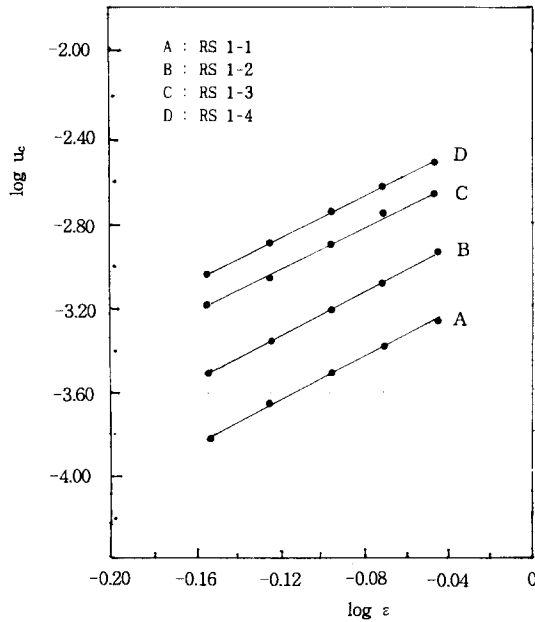


Fig. 2. Relation between  $\log u_c$  and  $\log \epsilon$  of Polystyrene particles.

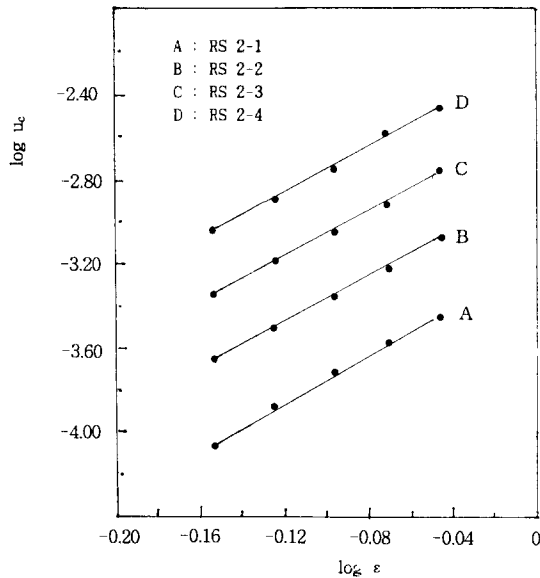


Fig. 3. Relation between  $\log u_c$  and  $\log \epsilon$  of silicate particles.

지름이 작아질수록  $n_1$  값이 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 같은 형태의 입자라 할지라도 입자지름이 작아질수록 입자들의 전체 표면적은 증가되므로 입자에 동반되는 액체의 양이 증가하기 때문이다. 즉 입장에 동반되는

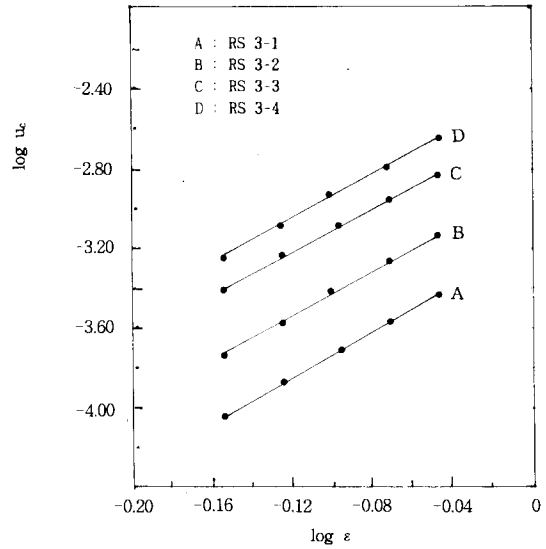


Fig. 4. Relation between  $\log u_c$  and  $\log \epsilon$  of salt crystal.

Table 4. Characteristics of Particles in Suspension.

Material	Characteristics			
	Particle Size (mm)	index $n_1(n)$	$1/d_v$	$K^*$
Polystyrene	0.210~0.250	4.95	4762	1.042
	0.297~0.350	4.89	3367	1.029
	0.420~0.500	4.85	2381	1.021
	0.500~0.590	4.82	2000	1.015
Silicate	0.149~0.177	5.91	6711	1.244
	0.210~0.250	5.65	4762	1.189
	0.297~0.350	5.49	3367	1.156
Salt crystal	0.420~0.500	5.39	2381	1.135
	0.210~0.250	5.62	4762	1.183
	0.297~0.350	5.49	3367	1.156
	0.420~0.500	5.38	2381	1.133
Glass bead	0.500~0.590	5.32	2000	1.120
	0.420~0.350	4.75	2381	1.000

$K^*$  : hydrodynamic volume factor

액체의 양은 입자지름과 함수관계에 있으며, 또 이와 같이 동반되는 액체로 인하여 부피농도가 조금 크고, 밀도가 조금 감소된 연질구형입자를 포함하는 서스펜션에서의 침강특성을 갖게되어 부피농도 변화에 따른 침강속도의 상대적 감소를 크게하고 따라서  $n_1$  값도 증가하는 것으로 판단된다. 또한 입자표면의 불규칙성의 정도가 증가할수록 동반되는 액체의 양이 증가하여  $n_1$  값을 더욱 증가시키는 것으

로 생각된다.

그림 5 및 6, 7은 이상에서 한 13종의 각종 입자들의 최소지름  $d_v$ 의  $(1/d_v)$ 와 유체역학적 부피인자  $K$  ( $K$ 는  $n_i/n$ 로 정의) 사이의 관계를 도시한 것이며, 이들 사이의 관계는 거의 선형을 이루었다. 여기서 비구형입자의 기울기

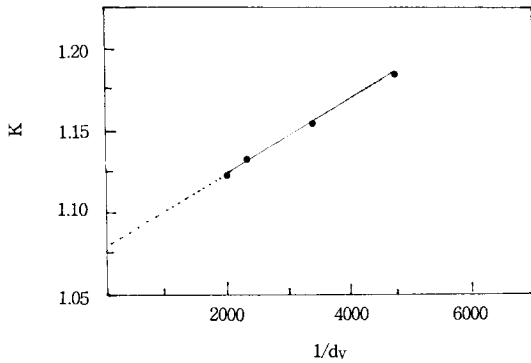


Fig. 5. Relation between the hydrodynamic volume factor and  $1/d_v$  of Polystyrene particles.

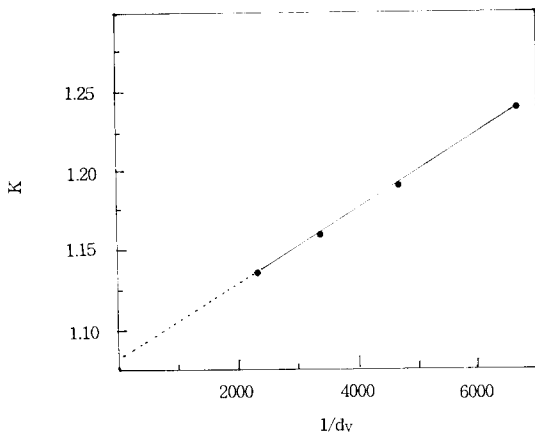


Fig. 6. Relation between the hydrodynamic volume factor and  $1/d_v$  of Silicate particles.

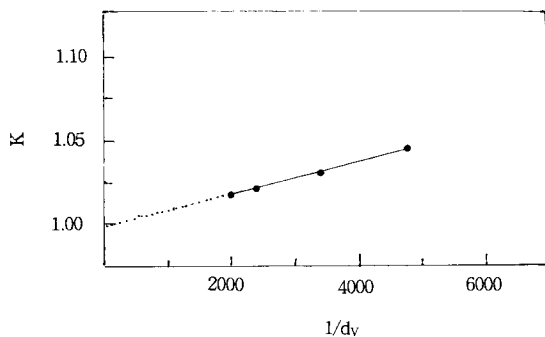


Fig. 7. Relation between the hydrodynamic volume factor and  $1/d_v$  of salt crystal.

지표  $n_i$ 에 대하여 다음과 같은 실험식을 얻을 수 있다.

$$n_i = n(a + b/d_v) \tag{15}$$

여기서  $a$ 와  $b$ 는 입자모양에 따른 상수이다.

구형 및 비구형입자를 포함하는 2종의 서스펜션의 침강에서 기벽효과를 검토하기 위하여 침전관의 지름을 40mm, 27mm 및 12.5mm로 바꾸면서 같은 조건의 실험을 반복하였을 때 얻은 값에 대한 실험값과 식 (9)에 의한 계산값 사이의 관계를 표 5에 나타내었다. 이 표에서  $d_i/d_v$ 가 50이상이면 기벽효과 영향이 거의 없으며, Richardson-Zaki식에 의한  $n$ 대  $d_i/d_v$ 사이의 선형관계도 관찰할 수 없었다.

Table 5. Relation between Index  $n(n_i)$  and  $d_i/d_v$ .

Run series	Particle	$d_i/d_v$	$n(n_i)$ from experiment	$n$ from eq.(9)
4-1	Glass bead	100	4.75	4.85
		64.3	4.76	4.95
		29.8	4.87	5.31
2-4	Silicate	100	5.39	—
		64.3	5.39	—
		29.8	5.48	—

### 5. 결 론

입자의 형태와 크기가 다른 단일종입자를 포함하는 서스펜션의 침강에서 고체입자표면에 부착동반되는 액체로 인하여 서스펜션의 침강속도와 기울기 지표  $n$ 값에 미치는 영향에 대하여 본 실험조건하에서 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 비구형입자를 포함하는 서스펜션의 침강에서  $\log$ 대  $\log \epsilon$ 선의 기울기 지표  $n_i$ 는 입자의  $n$ 값에 대한 Richardson-Zaki식에 의한 계산값보다 항상 크고 또한 실험값에 의한  $n$ 대  $(d_i/d_v)$ 사이에는 Richardson-Zaki식에서와는 달리 선형관계도 없었다.

2) 주어진 부피농도에서 입자크기가 작아지거나 입자의 불규칙성이 증가하면 서스펜션의 침강속도가 감소하고  $n_i$ 값은 증가하였다. 이것은 동일한 부피농도에서는 입자크기의 감소와 불규칙성의 증가는 입자에 동반되는 액체량을 증가시키기 때문에 전체부피농도가 조금 커지고 밀도가 감소된 연질구형입자와 같

이 행동하는데 기인하는 것으로 판단된다.

3) 비구형입자를 포함하는 서스펜션의 침강에서 기울기지표  $n(n_i)$  값에 대하여 다음과 같은 실험식을 얻었다.

$$n_i = n(a + b/d_v)$$

여기서  $a, b$ 는 입자형태에 기인하는 상수이고,  $n$ 은 구형입자로 된 서스펜션의 기울기지표이다. 위 식에서  $n_i$ 는 입자지름의 역수에 거의 비례함을 알 수 있었다.

#### Nomenclature

$c$  : volume of particle per unit volume suspension.

$d$  : particle diameter.

$d_v$  : minimum particle diameter.

$d_t$  : tube diameter.

$F$  : total drag force on particle.

$g$  : acceleration due to gravity.

$K$  : hydrodynamic volume factor( $n_i/n$ ).

$n$  : slope obtain from the plots of  $\log u_c$  versus  $\log \epsilon$

$R'e_0$  : Reynolds number for particle under terminal falling velocity.

$u$  : velocity.

$u_c$  : sedimentation velocity of particle in concentrated suspension.

$u_i$  : settling velocity of particle in infinite dilute solution.

$u_0$  : terminal falling velocity.

$u_p$  : velocity of particle relative to fluid.

#### Greek symbols

$\epsilon$  : voidage.

$\rho$  : density of liquid.

$\rho_s$  : density of suspension.

$\rho_s$  : density of solid.

$\mu$  : viscosity of liquid.

$\mu_c$  : viscosity of suspension.

#### References

1. Stokes. G. G. : Trans. Cam. Phil. Soc., 9, 8 (1851).
2. Robinson. C. S. : Ind. Eng. Chem., 18, 869 (1926).
3. Steinour. H.H. : *ibid*, 36, 628(1944).
4. Hswksley. P. G. : Ind. of Phys., Symposium, 114(1950).
5. Ladenburg. R. : Ann. Phys., 23, 447 (1907).
6. Davies. C. N. : Proc. Phys., 57, 259(1945).
7. Davies. C. N. : Proc. Roy. Soc., A200, 100 (1949).
8. Heywood. H., : J. Imp. Coll, Chem. Eng. Soc., A, 17(1948).
9. Vand. V : J. Phys. Coll. Chem., 52, 277 (1948).
10. Work. L. T. and Kohler. A. S. : Chem. Eng. New York, 36, 701(1940).
11. Richardson. J. F. and Zaki. W. N. : Trans. Inst. Chem. Eng., 32, 35(1954).
12. Richardson. J. F. and Zaki. W. N. : Chem. Sci., 3, 65(1954).
13. Ward. S. G. and Whitmore, R. L. : Brit. J. Appl. Phys., L, 325(1950).
14. Smith. T. N. : Trans. Inst. Chem, Eng., 43, T311(1965).
15. Smith. T. N. : *ibid* 44 T153(1966).
16. Davies. R. : Powder Technol., 2, 43(1968).
17. Davies. R. and Kaye. B. M. : *ibid*. 5, 61 (1971).
18. Lockett. M. J. and Al-habbooby. H. M. : Trans. Inst. Chem. Eng., 51, 281(1973).
19. Lockett. M. J. and Al-habbooby H. M. : Powder Technol., 10, 67(1974).
20. Richardson. J. F. and Shabi. F. A. : Trans. Inst. Chem. Eng., 3833(1960).
21. Richardson. J. F. and Meikle. R. A. : *ibid* 39, 348(1960).