

## 쿠엣트 응집기에서 화이트카본의 응집현상

전 귀 · 최창균

서울대학교 공과대학 화학공학과  
(1985년 12월 26일 접수, 1986년 2월 10일 채택)

### Flocculation of White Carbon in a Couette Flocculator

Gui Jeon and C. K. Choi

*Department of Chemical Engineering, College of Engineering,  
Seoul National University, Seoul 151, Korea*  
(Received 26 December 1985; accepted 10 February 1986)

#### 요 약

수용액내에 부유하고 있는 화이트카본 미립자의 효율적인 제거를 위한 방법으로 내부원통이 회전하는 수평 쿠엣트 응집기를 사용하여 고분자응집제의 첨가하에서 연속계의 응집현상을 관찰하였다. Taylor 수, 평균속도구배와 교반시간이 응집에 미치는 영향을 실험으로 살펴보았으며 응집 정도는 평균침강속도, 투과도 및 침전물의 체적등으로 측정되었다. 이로부터 응집은 교반시간 초기에 급격히 일어나고,  $1000 < Ta < 2500$  영역에서는 약 100초의 최적교반시간이 존재하였으며  $Ta \approx 2300$ 에서 응집이 가장 잘 이루어짐을 밝혔다.  $Ta > 2300$  영역에서는 최적교반시간이 지수적으로 감소하는 경향을 나타냈으며  $Ta > 3400$  영역에서 최적 Gt 값이  $10^4$ 으로 거의 일정한 값을 보였다.

**Abstract**—The continuous flocculation to remove fine particles of White Carbon suspended in the water was investigated experimentally by using the horizontal Couette flocculator of which the inner cylinder is rotating. The effects of the Taylor number, the mean velocity gradient and the retention time on flocculation caused by a polymer flocculant were examined systematically. The extent of flocculation was decided by measuring the average settling rate, the light transmittance and the volume of sediment. It was found that particles were flocculated very easily at a very short retention time. The optimum retention time was about 100 seconds in the region of  $1000 < Ta < 2500$  and the best flocculation was produced at  $Ta \approx 2300$ . When  $Ta > 2300$ , the optimum retention time decreased exponentially and the optimum Gt (root mean square velocity gradient product retention time) values were found to be about  $10^4$  in the region of  $Ta > 3400$ .

#### 1. 서 론

정수와 폐수처리에 있어서 미립자들을 응집시키는 조작은 침강이나 여과과정에 앞서 매우 중요하다. 이 응집과정에서 과거에는 응집제로 석회, 백

반과 같은 무기물을 사용하였으나 최근에는 고분자 물질을 단독으로 또는 무기물을 함께 사용하여 큰 효과를 보고 있다. 응집의 대부분은 현탁액에 있어서 입자의 충돌수에 의존하며 양이온성 고분자응집제를 사용하므로써 응집물의 전하중화와 가교형성을

동시에 유도하여 응집효율을 높일 수 있다.

입자의 충돌은 Smoluchowski[1]가 정지상태와 유동상태의 매체에 대하여 층류영역에서 충돌에 대한 모델을 제시하였고 Camp[2]가 평균속도구배를 정의하여 이 모델을 난류영역까지 확장하였다. 응집을 위한 장치로는 주로 교반탱크형 응집기가 많이 사용되어 왔다[3~5]. 이러한 응집기들은 유동형태가 불규칙적이고 매우 복잡하여 해석이 어려우며 교반용 임펠러 선단영역과 임펠러영역에서 속도구배와 에너지분산율이 매우 커서 응집물의 파열이 일어나는 단점을 지닌다. 이러한 단점을 보완하기 위한 일환으로 Van Duuren[6]에 의하여 쿠틀트 응집기가 응집현상 규명에 사용되었고 이후 Ives와 Bohle[7, 8]등에 의하여 실험이 행하여졌다.

그러나 이들의 연구는 외부원동이 회전하는 경우에 대한 층류영역의 해석에 국한되거나 회분실험으로 그 해석범위가 매우 좁아 현실성 있는 결과를 제시하지 못하였다.

위와 같은 사항들을 감안하여 본 연구에서는 내부원동이 회전하는 쿠틀트 응집기를 제작하여 화이트카본이 수용액 중에서 양이온성 고분자응집제에 의하여 응집되는 현상을 실험적으로 고찰하여 보았다. 이와 같은 쿠틀트 응집기는 자체내에서 발생하는 난류에 의한 응집을 유도하게 되므로, 임펠러에 의한 교반응집에 비하여 균일한 응집을 일으키는 물론 조직적인 응집현상 규명을 가능하게 하여 줄 것으로 예상된다. 따라서 수평선상의 쿠틀트 응집기에서 연속실험을 수행하여 응집의 최적조건을 구하여 보았다.

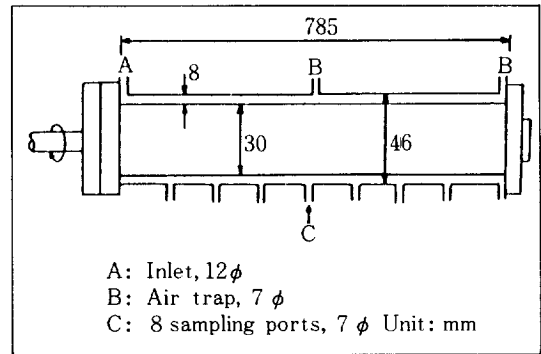
## 2. 실험

### 2-1. 시료

실험에 사용된 현탁액은 한불화학주식회사의 화

**Table 1. Physical properties and compositions of White Carbon.**

RESIDUE 325 MESH % MAX.	5
RESIDUE 100 MESH % MAX.	0.02
AVG. DIAMETER $m\mu$	20
DENSITY $g/cm^3$	1.95
SiO <sub>2</sub> %	96.9
H <sub>2</sub> O %	3.1

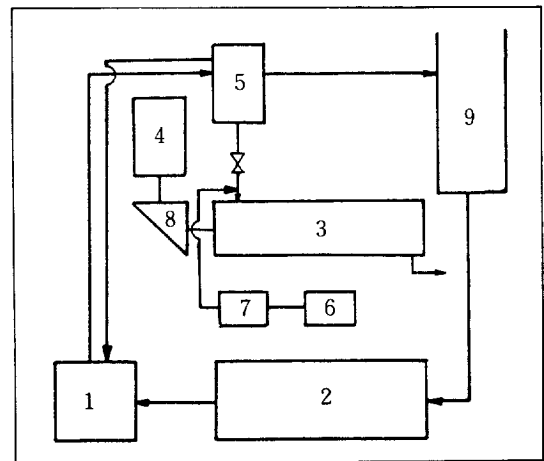


**Fig. 1. Schematic view of the Couette flocculator.**

이트카본 (Zeo-Sil 45)으로 물과 함께 시료용 교반 탱크에 넣고 3분간 1850 rpm으로 교반시켜 준비하였으며 고분자응집제는 양이온성으로 American Cyanamid Co.의 Superfloc C-458을 0.1 g/l 용액으로 만들어 사용하였다. 화이트카본의 물리적 특성과 조성은 Table 1과 같다.

### 2-2. 실험장치 및 방법

쿠틀트 응집기는 두개의 아크릴원통을 사용하여 내경과 외경의 비를 0.65로 하여 제작하였다. 장치의 제원은 Fig. 1에 나타나 있다. 전반적인 실험장치는 Fig. 2와 같으며 응집에 필요한 동력을 얻기



**Fig. 2. Schematic view of a flocculation system.**

1. Slurry pump
2. Intermediate tank
3. Flocculator
4. DC-motor
5. Head tank
6. Flocculant tank
7. Micropump
8. Gear
9. Storage tank

위하여 1/8 마력의 직류전동기를 사용하였고 다중 변속기어를 사용하여 회전수의 변화를 최소화하였다. 현탁액은 40 l의 저장탱크에서 연속적으로 준비되어 중간저장탱크로 보내어지며 그곳에서 1/30 마력 교류펌프로 head 탱크로 올려 보내어 유량조절 밸브를 통하여 주입되고 일부는 순환되었다. 반면에 응집용액은 응집액저장 탱크에서 미량펌프에 의하여 유량이 조절되어 주입부 ( $\frac{1}{4}$ " tee)에서 현탁액과 각각 5 mg/l, 2 wt%의 농도로 혼합되어 응집기에 주입되었다. 큐엣트 응집기에는 8 개의 시료채취부가 있으며 각 채취부는 유동이 정상상태에 도달하였을 경우에 교반시간으로 간주할 수 있고 최대 4 분까지의 교반시간을 얻을 수 있었다. 실험 조작후 약 30분 경과시에 유동이 정상상태에 도달한 것으로 보고 시료를 각 채취부에서 취하여 응집 정도를 측정하였다. 모든 실험은 실온에서 수행되었다.

### 2 - 3. 응집정도 측정

응집의 정도는 침강속도, 빛의 투과도 및 침전물의 부피등으로 측정되었다. 침강속도는 직경 5cm, 높이 30 cm의 아크릴원통으로 제작된 침강기를 사용하여, 시간에 따른 침강계면의 높이를 측정함으로써 결정되었고 간섭침강 이전의 침강높이와 시간에 대하여 평균침강속도로 산출되었다. 빛의 투과도는 침강시작 100초후 액면 밑 6 cm 지점에서 10 ml의 용액을 취하여 Bausch & Lomb Co.의 비색계(Spectronic 20)에서 500 nm의 파장으로 측정되었다. 이때 증류수를 100으로 하여 투과도의 기준점을 삼았다. 침전물의 부피는 침강기에서 침강시작 500초 후에 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3 - 1. Taylor수와 교반시간의 영향

중심이 같은 두 원통사이의 유체의 유동은 내부 원통이 회전함에 따라 원통 가까이에 있는 유체의 입자들이 원심력에 의하여 바깥방향으로 추진력을 받아 불안정한 상태가 되며 그 영향으로 원통의 축방향을 따라 규칙적으로 서로 반대인 고리쌍의 배열로 와류(vortex)가 형성되는데 이것을 Taylor 와류라고 호칭한다[9]. 이를 개략적으로 도시하면

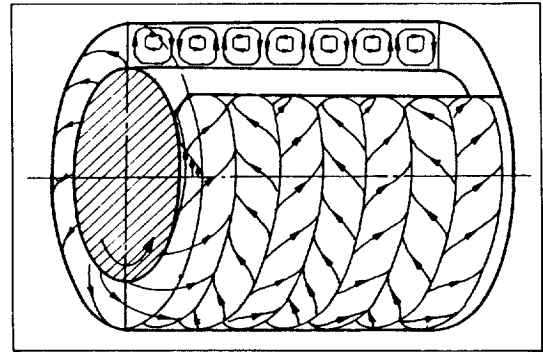


Fig. 3. Laminar Taylor vortices between two concentric cylinders

(Inner cylinder rotating, outer cylinder at rest).

Fig. 3 과 같다. Taylor 와류의 안정성은 외부원통이 정지되어 있고 내부원통이 일정속도로 회전하는 경우에 대하여 Rayleigh[10]에 의하여 다음과 같은 무차원 Taylor수가 기준이 됨이 알려져 있다.

$$Ta = \frac{2 \omega d^2}{\nu} \frac{\eta}{\sqrt{1 - \eta^2}} \quad (1)$$

여기서  $\nu$ 는 유체의 동점도,  $d$ 는 두 원통사이의 간격,  $\omega$ 는 내부원통의 각속도,  $\eta$ 는 내부원통과 외부원통의 비를 나타낸다.

Taylor수는 취급되는 유체의 특성과 응집기의 크기 및 교반속도를 동시에 고려해 주는 장점을 지니고 있다. 그러므로 본 연구에서는 설정된 계에 대하여 교반속도를 Taylor수로 나타내었다.

Fig. 4는 Taylor수와 교반시간에 대한 평균 침강

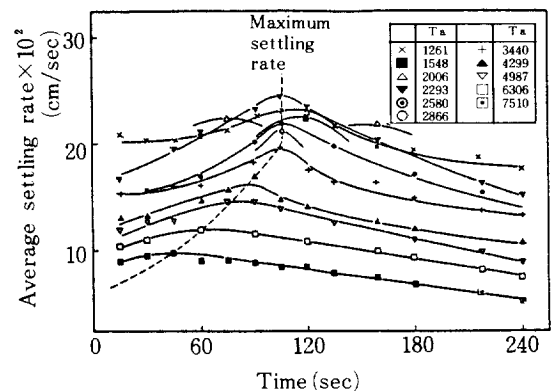


Fig. 4. Effect of retention time on the average settling rate in the Couette flocculator.

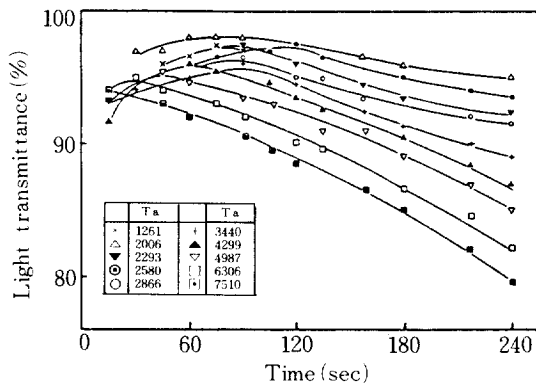


Fig. 5. Effect of retention time on the light transmittance in the Couette flocculator.

속도의 관계를 보여주고 있다. 전반적으로 평균침강속도는 교반시간이 증가함에 따라 증가하여 최대점을 보인 후 감소하는 경향을 나타낸다. 이것은 교반에 의하여 입자의 응집이 초기에 형성하게 이루어진 후 점차적으로 고밀화되고 크기가 증가하나 적정시간에 이르러 더이상 커지지 못하고 파열되는 것에 기인하는 것으로 예측된다. 그러나 응집물의 크기는 교반시간보다 Taylor수의 증가로 인한, 즉 단위부피의 유체에 전달되는 에너지의 양에 의한 영향이 더욱 큼을 알 수 있다. 본 실험에 의하면 Taylor수 2300 부근에서 응집이 가장 잘 이루어졌으며 그보다 작은 범위에서는 응집이 부분적으로 일어나며 전반적인 응집현상이 불안정함을 관찰하였다. 또한  $1000 < Ta < 2500$  영역에서는 100초 정도의 최적교반시간이 존재함을 보여주며 최대응집점을 중심으로 Taylor수가 증가함에 따라 최대침강속도를 갖는 교반시간이 지수적으로 감소함을 확인하였다.

Fig. 5는 Taylor수와 교반시간에 따른 투과도의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 4와 유사한 경향을 보이고 있다. 투과도 역시 전반적으로 각 Taylor수에 대하여 최대투과도를 보이고 감소하는데 최대투과도 이후에서 나타나는 시간에 따른 투과도의 감소 경향이 낮은 Taylor수에서는 매우 완만하나 Taylor수가 증가할수록 선형적으로 감소함을 보여준다. 또한 투과도의 감소경향이 침강속도에 비하여 급격한 경향을 보이는 것은 전달된 에너지의 증가로 응집물내에 함입응집된 미립자들이 응집물의 파열시 파생되어 현탁액에서 다시 안정화되는 것으로 생각된다.

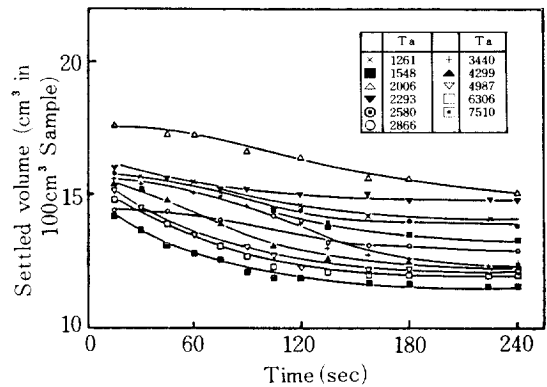


Fig. 6. Effect of retention time on the volume of sediment in the Couette flocculator.

다[11].

Fig. 6은 Taylor수와 교반시간에 따른 침전물의 부피변화를 나타낸 것으로 응집물의 파열과 고밀화 경향을 잘 보여주고 있다. 응집과정이 진행되면서 초기에 응집이 급격히 일어난 후 응집물이 고밀화되어 시간이 더욱 경과되어도 부피의 변화는 거의 없었다. 그러나 Taylor수가 3400을 지나면서 부피 변화가 초기에 급격히 일어나는데 이는 유동이 Taylor와류를 가진 난류영역으로 접어들면서 응집물의 파열이 심해지며 시간이 경과함에 따라 파열된 작은 응집물들은 더 이상 파열되지 않는 것으로 여겨진다. Taylor와류를 가진 난류영역에서 나타나는 특성은 Fig. 4, 5에서도 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 각 Taylor수에 따른 최대침강속도와 최대투과도를 나타낸 것으로 Taylor수 2300 전반부에서는 최대침강속도와 투과도가 일정한 경향을 보이

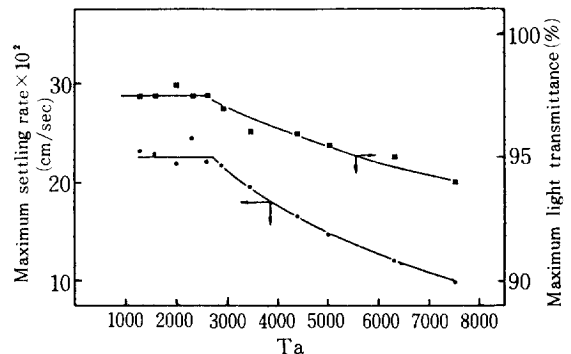


Fig. 7. Diagrams of maximum settling rate and maximum light transmittance vs.  $Ta$  in the Couette flocculator.

며 그 후의 감소경향이 지수함수의 형태를 나타낸다. 이것은 유동이 Taylor와류를 가진 층류영역에서 Taylor와류를 가진 난류영역으로 전이되면서 나타나는 현상으로 생각된다.

### 3-2. 평균속도구배와 교반시간의 영향

속도구배의 개념은 수처리공정에서 광범위한 응용범위를 차지하고 있으며 특히 급속혼합기나 응집기의 설계에서 중요한 매개변수이다. 혼합강도의 척도로 정의되는 평균속도구배는 특히 유동이 복잡한 난류영역의 해석에 기초자료가 되고 있으며 Camp [2]의 정의를 사용하면 큐엣트 응집기에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$G = (\omega T / V \mu)^{1/2} \quad (2)$$

여기서 G는 평균속도구배이며, T는 내부원통에 의하여 유체에 전달되는 회전우력(torque),  $\mu$ 는 유체의 점도, V는 유체의 부피를 나타낸다.

층류에서의 회전우력은 내부원통이 회전하는 경우에 대하여 아래와 같이 정의된다.

$$T = \frac{4\pi\mu h r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2)} \omega \quad (3)$$

여기서 h는 응집기의 길이,  $r_1$ ,  $r_2$ 는 각각 내부원통과 외부원통의 반경을 나타낸다.

유체의 유동이 불안정해짐에 따라 유동은 층류에서 Taylor와류를 가진 층류영역으로 전이되며 내부원통에 의하여 유체에 전달되는 회전우력이 비선형의 값을 가지게 된다. 그러므로 Taylor와류를 가진 층류영역이나 Taylor와류를 가진 난류영역에서의 회전우력은 보정을 요하게 되며 Stuart [12], Donnelly와 Simon [13], Davey [14] 등에 의하여 발전된 안정성 이론을 이용하여 가능하게 된다. 본 연구에서는 Davey [14]의 이론을 사용하였으며 아래와 같은 관계식으로 표현된다.

$$T = a\omega^{-1} + b\omega \quad (\omega > \omega_c) \quad (4)$$

$$a = -9\pi(r_1 + r_2)h\rho\nu^3\delta Ta_c/64d^3$$

$$b = \frac{2\pi r_1^2 h \rho \nu}{d} \left\{ \frac{2r_2^2}{r_1(r_1 + r_2)} + \delta \frac{r_1 + r_2}{2r_1} \right\}$$

여기서 a, b는 상수이며  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\delta$ 는 계의 특성에 의하여 주어지는 상수로 본 연구의 계에

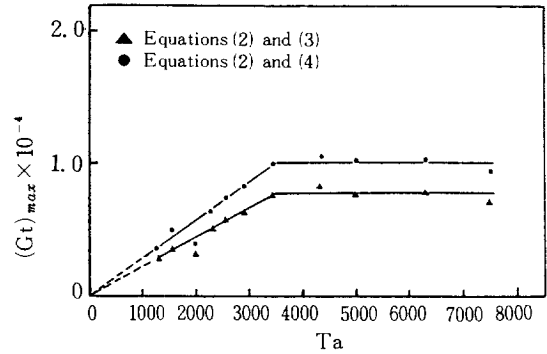


Fig. 8. Diagram of  $(Gt)_{max}$  vs.  $Ta$  in the Couette flocculator.

대하여 1.0614이며  $Ta_c$ 는 와류가 발생되기 시작할 때의 임계 Taylor수를 나타낸다.

평균속도구배 G는 시간의 역차원을 가지므로 교반시간 t를 곱하면 무차원수 Gt가 생성된다. Fig. 8은 각 Taylor수에서 최대침강속도를 가지는 점들을 중심으로한  $(Gt)_{max}$ 의 관계를 나타낸 것으로 평균속도구배가 선형이론과 Davey의 제안식으로 계산되어 비교되고 있다. 여기서 주시할 점은 Taylor수 3400이후의 Taylor와류를 가진 난류영역에서 보정된 Gt값이  $10^4$ 으로 거의 일정하게 나타나는 것이다. 이는 난류영역에서 평균속도구배가 증가하면 최적응집을 나타내는 교반시간은 반대로 감소하여 이 둘의 곱이 일정한 값으로 표현될 수 있음을 시사하는 것이다. 이러한 결과는 기존 수처리분야의 연구에 의하여 제시된 최적 Gt값 [2]  $10^4 \sim 10^5$ 보다 훨씬 일관성있는 값을 나타내는 것으로 큐엣트 응집기가 더욱 효율적인 응집기의 설계자료를 제시할 수 있다는 가능성을 보여주는 것이다.

## 4. 결 론

수평선상의 큐엣트 응집기에서 2 wt%의 화이트카본 현탁액과 5 mg/l의 양성고분자응집제를 사용하여 연속실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 응집은 교반시간 초기에 급격히 일어났으며  $1000 < Ta < 2500$ 의 Taylor와류를 가진 층류영역에서는 약 100초의 최적교반시간이 존재하였다.
2.  $Ta \approx 2300$ 에서 응집이 가장 잘 이루어졌고

Ta > 2300 영역에서는 최적교반시간이 지속적으로 감소하였으며 유동이 Taylor 와류를 지닌 난류영역으로 전이되면서 평균침강속도와 투과도의 감소경향이 증가되었다.

3. Ta > 3400의 Taylor 와류를 지닌 난류영역에서는 최적 Gt 값이  $10^4$ 으로 거의 일정한 경향을 나타내었다.

## 감 사

이 논문은 한국학술진흥재단의 1985년도 연구비에 의하여 연구되었음을 밝히며 한국학술진흥재단에 심심한 사의를 표한다. 또한 본 연구의 기초를 마련하여 준 한국과학기술원 화학공정연구실 윤창구박사의 후의에 감사드리는 바이다.

## NOMENCLATURE

- a : Constant, see equation (4)  
 b : Constant, see equation (4)  
 d : Gap length between inner and outer cylinder radius [cm]  
 G : Root mean square velocity gradient [ $\text{sec}^{-1}$ ]  
 h : Length of the cylinder [cm]  
 r : Radius of the cylinder [cm]  
 T : Torque transmitted by inner cylinder [ $\text{g-cm}^2/\text{sec}^2$ ]  
 t : Retention time [sec]  
 Ta : Taylor number =  $\frac{2\omega d^2}{\nu} \frac{\eta}{\sqrt{1-\eta^2}}$ , dimensionless  
 V : Volume of the liquid [ $\text{cm}^3$ ]

## Greek Letters

- $\delta$  : Constant, see equation (4)  
 $\rho$  : Density of the liquid [ $\text{g/cm}^3$ ]

- $\nu$  : Kinematic viscosity [ $\text{cm}^2/\text{sec}$ ]  
 $\mu$  : Absolute viscosity [ $\text{g/cm-sec}$ ]  
 $\omega$  : Angular velocity of inner cylinder [rad/sec]  
 $\eta$  : Ratio of inner to outer cylinder radius, dimensionless

## Subscripts

- 1 : Inner cylinder  
 2 : Outer cylinder  
 c : Critical

## REFERENCES

- Smoluchowski, M.V. : *Z. Phys. Chemie.*, **92**, 129 (1917)
- Camp, T.R. : *Trans. ASCE*, **120**, 1 (1955).
- Hudson, H.E. and Wolfner, J.P. : *J. AWWA*, **59**, 1257 (1967).
- Tomi, D.T. and Bagster, D.F. : *Trans. Inst. Chem. Eng.* **56**, 1 (1978).
- Leetvaar, J. and Ywema, T.S.J. : *Water Research*, **14**, 135 (1979).
- Van Duuren, F.A. : *J. Sani. Eng. Div., ASCE*, **94**, 671 (1968).
- Bhole, A.G. and Ives, K.J. : *J. Env. Eng. Div., ASCE*, **17**, 99 (1973).
- Ives, K.J. and Bhole, A.G. : *Water Research*, **11**, 209 (1977).
- Taylor, G.I. : *Proc. Roy. Soc. A*, **157**, 546 (1936).
- Rayleigh, L. : *Proc. Roy. Soc. A*, **93**, 148 (1917).
- Weber, W.J. : *Physicochemical Processes for Water Quality Control*, p. 74, Wiley-Interscience, N.Y. (1972).
- Stuart, J.T. : *J. Fluid Mech.*, **4**, 1 (1958).
- Donnelly, R.J. and Simon, N.J. : *J. Fluid Mech.*, **7**, 401 (1960).
- Davey, A. : *J. Fluid Mech.*, **14**, 336 (1962).