

## 탄산칼슘-물 이성분계 슬러리의 침강 특성을 이용한 반연속식 침전탑의 실험적 해석에 관한 연구

안원술·노승백·김정배·박상원·최창균\*  
계명대학교 화학재료공학부·계명대학교 환경학부·서울대학교 화학공학과  
(1998년 3월 18일 접수)

### A Study on Experimental Analysis of Semi-Continuous Settling Tank using Characteristics of Solid Sedimentation in the Binary CaCO<sub>3</sub>-Water Slurry

Won-Sool Ahn, Seung-Baik Rho, Jeung-Bea Kim,  
Sang-Won Park\*, and Chang-Kyun Choi\*

Dept. of Chemical Engineering, Keimyung University, Taegu 704-701

\*Institute of Environmental Science, Keimyung University, Taegu 704-701

\*Dept. of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742

(Manuscript received 18 March 1998)

In the present paper, batch and semi-continuous settling characteristics of a binary calcium carbonate-water system were investigated. Using experimental data of batch settling characteristics, a graphical analysis for a semi-continuous thickening column was developed and compared with experimental results on the basis of Kynch theory, only where the feed velocity line was within the limits of Kynch theorem III. The analysis showed good agreement with experiments. Quite erroneous results, however, was observed for the analysis of a sludge region on the underloaded operation, which was considered due to the deviation from the limits of theory.

Key words : semi-continuous thickening tank, calcium carbonate-water, slurry, settling

#### 1. 서 론

특수하게 디자인된 침전탑(settling tank)을 이용하여 분체 고형물과 물의 혼합 형태로 구성된 슬러리로 부터 농축된 슬러지를 얻어내거나 맑은 윗물을 받아내는 방법은 중력에 의한 고형물의 자연적인 침강현상을 이용하므로, 물리적으로 외부에서 기계적인 힘을 가해주어야 하는 여과법이나 원심 분리법 등에 의한 분리법보다는 상대적으로 보아 경제적 이점이 많기 때문에 탄산칼슘이나 황산 등을 화학재료를 생산하는 화학공장의 폐수처리 분야 또는 하수처리 분야 등에서 중요한 단위조작으로 취급되고 있다. 이러한 방법은 침전법을 이용하여 미세한 고체입자들과 물의 혼합물인 슬러리로 부터 고-액을 효과적으로 분리하는 것이 목적이므로 합리적으로 연구된 최적 침전탑의 설계에 대한 연구는 필수적이다.

이 분야에 대하여는 1916년 Coe와 Clevenger(1916) 등이 회분식침강(batch settling) 실험을 통하여 간단하게 침전탑의 단위면적을 계산하기 위한 기본식을 제시

한 이래로 꾸준히 연구되어 왔으며 Comings(1940)는 농도기울기(concentration gradient)와 유량속도(feed velocity)가 침전현상에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였고, Kynch(1952)에 이르러서 수학적인 표현을 빌어 침전현상을 이론적으로 정립하기에 이르렀다. 특히 Kynch는 침전탑 내에서의 슬러리 중의 고체입자들의 침강속도는 침전탑 내의 국소농도(local concentration)에만 의존한다 라고 가정된 뒤에 슬러리와 맑은 윗물과의 경계면(slurry-water interface)의 시간에 따른 높이 변화를 관찰함으로써 고체 입자들의 침강속도는 농도의 함수로 나타낼 수 있음을 밝혔다. 그는 이러한 실험적 관찰을 근거로 하여 침강속도와 농도를 관련지어 해석하는 플럭스(flux)이론을 제시하였다. 또한 이로부터 슬러리내의 농도 불연속면의 운동을 수학적으로 해석하고, 또 여러 가지 형태의 침강현상에 대한 해석 방법을 제안하였으며 실험이 간단한 회분식(batch settling) 침강곡선을 이용하여 연속식 침전탑(continuous thickening column)을 해석하기 위한 기초 이론을 세웠다.

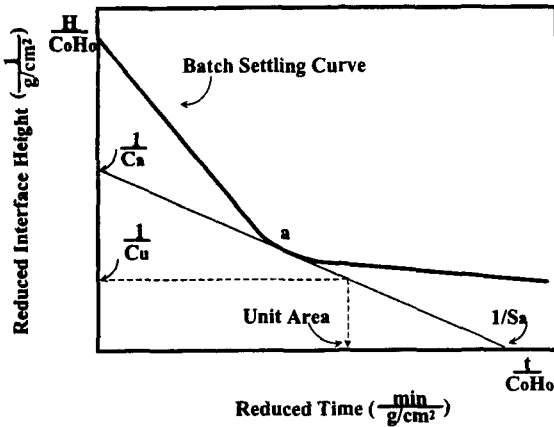


Fig. 1. Graphical sketch of Kynch Theorem III.

이를 근거로 하여 Talmage와 Fitch(1965)등은 회분식 침강곡선으로부터 직접 침전탑의 단위 면적을 계산해 낼 수 있는 작도법을 제안하였으며 Shannon과 Tory(1965)등은 Kynch이론을 더욱 발전시켜 회분식이나 연속식 침전을 구별함이 없이 동시에 취급할 수 있는 기본 이론과 함께 플렉스 곡선의 제작 방법과 해석 방법 뿐만 아니라 주어진 플렉스 곡선으로부터 회분식 침강 특성 곡선을 유도해 내는 방법을 제시하였다. 또한 O-bata와 Wadanabe(1979)등은 회분식 침강곡선이 플렉스 곡선과 밀접한 관계가 있음에 착안하여 플렉스 곡선을 이용하지 않고도 회분식 침강 곡선으로부터 작도법에 의해 직접 연속식 또는 반 연속식으로 조업되는 침전탑을 해석하는 방법을 발표하였다. 이 후에도 여러 연구자들(Tiller, 1981; Font, 1991)에 의해 이 분야의 연구가 진행되고 있으나 현재까지도 Kynch 이론을 크게 벗어나고 있지 못하다는 점을 살펴보면 이 분야에 대한 연구의 더욱 깊은 필요성을 찾아 볼 수 있다.

본 연구에서는 비교적 이론적 해석이 용이한 탄산칼슘-물의 이성분계 슬러리를 이용하여, 먼저 회분식 침강 특성을 조사하고 이와 관련하여 침전탑이 연속식 또는 반연속식으로 조업될 때 생기는 여러 가지 현상을 관찰하여, 회분식 침강 실험으로부터 얻은 결과와의 연관성을 조사하는 데 목적을 두었다. 특히 회분식 침강 곡선으로부터 실제로 작도법에 의해 반 연속식으로 움직이는 침전탑을 설계하여 보고, 회분식 침강곡선 중의 각 구역에 대해 이론과 비교하여 보도록 하였다. 일반적으로 연속식 침전탑의 조업에 영향을 미치는 변수들은 급송 유량 속도(feed flow rate), 일류 속도(overflow rate), 밀층 흐름 속도(underflow rate), 침전탑의 단위 면적, 그리고 사용되는 슬러리의 침강 특성 및 농도 등이지만 급송 위치와 방법, 일류의 위치 또는 사용된 슬러리의 물리적 성질에 따라서도 조업 조건이 달라지게 된다. 따라서, 이들 모든 변수들을 모두 고려하여 침전탑을 해석하기란 매우 어렵다. 따라서 여기서는 과하중 조업과 저하중 조업의 두 가지 경우에 대해서 실험적으로 해석하고, 각 조업 변수와 실험적 해석 결과 간의 상호 관련성 여부에 대하여 연구하였다.

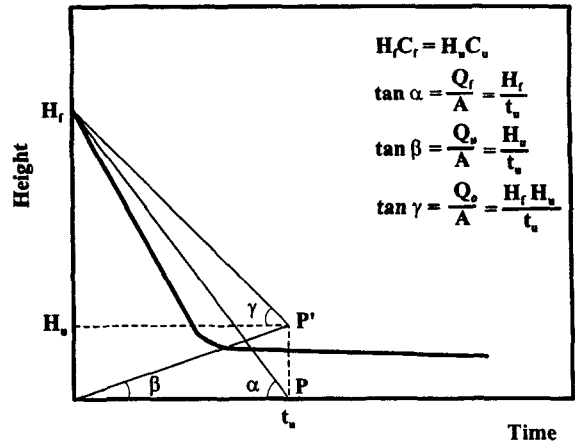


Fig. 2. Determination of operating point for a continuous semi-continuous settling tank using batch settling curve.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 Kynch 이론

Coe 와 Clevenger(1919) 이래로 밝혀진 바에 의하면 슬러리 중의 고형물의 침강 형태는 일반적으로 다음의 세 가지로 분류된 영역에서 각기 서로 다른 침강 특성을 보인다.

1) 자유침강영역(free setting region) : 이 영역내의 고체 입자들은 이웃의 입자들에게 서로 영향을 미치지 않으면서 고체 입자 자체의 밀도나 형태 등의 고유 특성에 따라 침강한다.

2) 구역침강영역(zone setting region) : 이 영역 내의 입자들은 기계적인 지지력을 가지지는 않으나 서로 응집하여 전체로서의 어떤 구조를 형성하여 이웃한 입자들과 같은 속도로 침강하게 된다. 이 때는 슬러리층과 맑은 윗층과의 사이에 뚜렷한 경계면이 생기고, 이 경계면이 시간에 따라 낙하하게 된다. 회분식 침강곡선은 이 경계면의 침강 시간에 따른 높이 변화를 나타낸 것이다.

3) 압축침강영역(compression setting region) : 이 영역에서의 입자들을 서로 기계적인 지지력을 가지고 침강하게되므로 침강속도가 현저히 감소하고 농축층의 생성 등에 의한 침강 특성의 변화를 수반하게 된다.

Kynch(1952)에 의해서 수학적인 모델을 통하여 기초 이론이 세워진 회분식 침강 현상에 대한 연구는 슬러리 내의 고체입자들의 침강속도는 침전탑 내부의 국소 농도에만 의존한다라는 가정을 하고 회분식 침강 곡선을 이용한 침전 현상의 해석과 물질 수지 및 플렉스 식을 이용한 수학적 표현이 주된 것으로서 이를 요약하면 다음의 세 가지로 간단히 압축할 수 있다.

① 이론 I : 일차불연속에 관한 것으로서, 슬러리 내에 어떤 명확한 농도의 불연속이 있어 이 불연속 면이 U의 속도로 침강 방향으로 전파해 간다면 U는 다음의 식 (1)과 같이 표시될 수 있다.

$$U = \frac{\Delta S}{\Delta C} \quad (1)$$

여기서  $\Delta S$ 는 불연속면 양쪽의 고체 입자 플렉스의 차

이이고  $\Delta C$ 는 농도 차이이다. 식 (1)은 불연속면 양쪽의 물질 수지로부터 유도될 수 있다. 즉, 불연속면의 위와 아래를 각각 하첨자 1과 2로 표시하면 다음의 식 (2)와 같다.

$$C_1(u_1 - U) = C_2(u_2 - U) \quad (2)$$

여기에서  $S_1 = C_1 u_1, S_2 = C_2 u_2$  이다.

② 이론 II : 이차 불연속에 관한 이론으로서, 만약 농도  $C_1$ 인 곳을 중심으로 이 근처에 농도구배 (concentration gradient)가 있을 때, 이 농도구배는  $\delta^*$ 의 속도를 가지고 침강 방향으로 전파해 가게 되고 식 (1)의  $\Delta C \rightarrow 0$ 으로부터 유도될 수 있으며 다음의 식 (3)으로 표시될 수 있다.

$$\delta^* = \left( \frac{\partial S}{\partial C} \right) \quad (3)$$

③ 이론 III : 위의 이론들을 바탕으로 하여 얻은 회분식 침강 곡선으로부터 도해법에 의해 침전탑의 단면적 계산하고자 하는 이론이다. Fig. 1은 전형적인 회분식 침강곡선을 나타낸다. 이 곡선상의 구역침강 영역의 어떤 점 a에서 이 곡선에 접선을 그으면 x축 (시간)과 y축 (높이)을 끊는 절편 들 중에서 y절편은  $1/C_a$ 이며 x절편은  $1/S_a$ 임을 나타낸다.

여기에서  $C_a$ 는 a점에서의 슬러리-윗물과의 경계면 바로 밑에 존재하는 고체 입자들의 농도이며,  $S_a$ 는 a점에서의 고체 입자들의 플럭스이다. 또한 침전탑에서의 밀층흐름의 슬러지농도를  $C_u$ 라 하면  $1/C_u$ 에서 이 접선과 마주치는 점에서의 플럭스의 역수( $1/S_u$ )가 농도  $C_u$ 의 슬러지를 뽑아내기 위한 침전탑의 단위면적을 나타낸다.

한편, 이론 I과 이론 II는 물질 수지로부터 유도되었으므로 앞에서 말한 슬러리의 침강 영역의 형태에 무관하게 일반적으로 성립하지만, 이론 III은 특별히 회분식 침강 중의 구역침강 영역에만 적용되며, 더욱이 이 영역에서의 침강 속도가 일정하고 이 구역(zone)이 침전탑 바닥에서부터 전파되는 경우에만 적용이 가능하다는 까다로운 제한이 있다.

## 2.2 회분식 침강곡선을 이용한 반연속식 침전탑의 해석

Kynch이론과 Talmage와 Fitch(1965) 또는 Obata와 Wadanabe(1979)등의 작도법을 이용하여 실험이 간단한 회분식 실험에서 직접 침전탑을 해석하는 것은 많은 제약 조건이 있지만, 실제의 문제에 있어서는 상당히 응용 가치가 높은 것이다.

Obata와 Wadanabe등에 의해 시도된 반연속식 침전탑의 해석법은 급송(feed)과 일류 (overflow)가 연속인 반면 밀층 흐름을 주기적으로 뽑아내는 방식으로 된 침전탑에 대한 것이며 초기에 균일한 농도의 슬러리가 급송되어 들어가면, 유입구의 위치를 중심으로 하여 윗 쪽에는 일류 영역이 생기고 유입구의 아래쪽에는 침강 영역이 형성되며, 또한 침전탑의 바닥에는 침전된 입자들이 쌓여 슬러지 영역을 이루게 된다. 정상상태로 조업되고 있는 연속식 침전탑에서는 연속적인 밀층흐름이 있

으므로 다음과 같은 물질 수지 식이 성립한다.

$$Q_f/A = Q_u/A + Q_o/A \quad (4)$$

여기에서  $Q$ 는 부피유량속도,  $A$ 는 침전탑의 단면적, 그리고 하첨자  $f, u, o$ 는 각각 급송, 밀층 흐름, 그리고 일류임을 나타낸다. 식 (4)에서 보이는 각각의 흐름들의 속도를 Fig. 2의 회분식 침강 곡선 상에 보이는 바와 같이  $\alpha, \beta, \gamma$ 로 나타내면, 그림의 P점이 연속식 침전탑의 조작점이 된다. 반연속식 침전탑에서는  $Q_u/A = 0$ 이 되므로 P점은 P점으로 이동하게 된다. 따라서 침전탑이 슬러리로 채워지고 난 후에는 식 (4)은 다음의 식 (5)로 된다.

$$Q_f/A = Q_o/A \quad (5)$$

반연속식 침전탑은 급송되는 고체 플럭스에 따라서 저하중, 임계하중 및 과하중 조업으로 나뉘게 되는데 임계하중 조업은 저하중과 과하중 조업의 분기점이 된다.

### 2.2.1 임계하중 조업

임계하중 조업은 배출(discharge)이 없을 때의 일류 농도  $C_o$ 가 영이 되는 최대 고체 플럭스로 정의된다. 이는 또한 주어진 침전탑의 최대 용량이기도 하다. 이러한 경우, 침강 구역의 고체입자들에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$C_f Q_f/A = C_f \cdot u(C_f) \quad (6)$$

여기에서  $u(C_f)$ 는 농도  $C_f$ 에 해당하는 슬러리 내의 고체 입자들의 침강속도이다. 회분식 침강곡선에서의  $u(C_f)$ 는 Fig. 3(a)에서 보이는 바와 같이 조업점 P에서의 기울기  $\tan \alpha$ 로 표시될 수 있고 이는 곧 반연속식 침전탑에서의  $Q_f/A$ 를 표시하게 된다. 한편, 조업이 시작된 후 임의의 시간  $t_a$ 에서 농축된 슬러지 층의 깊이와 침전탑 내부의 농도 분포는 회분식 침강곡선을 이용하여 다음과 같이 결정된다. 즉, 처음에 높이  $H_d$ 에 해당하는 급송 농도  $C_f$ 를 Fig. 3(b)의 x축 상의 임의의 위치에 정한다. 한편, 급송농도  $C_f$ 와 Kynch에 의해 일차 불연속이라고 정의된 불연속면이 임계농도  $C_c$ 와의 사이에서 생겨나서  $U(C_c)$ 의 속도로 침전탑의 바닥에서부터 전파해 올라가는 데 이는 Fig. 3(a)에서 원점 R과 S간의 기울기( $\tan \beta$ )로 나타내진다.  $C_c$ 는 임계점에서의 슬러리-물의 경계면 바로 밑의 농도를 나타낸다. 따라서 이 불연속면의 높이  $H_d$ 는 임의의 시간  $t_a$ 에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_d = U(C_c) t_a \quad (7)$$

또한, 슬러지 층의 평균농도  $C_o$ 와 슬러지층 내의 임의의 높이에서의 슬러지 농도  $C'$ 는 물질수지식을 이용하여 Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 결정된다. 임계점은 회분식 침강곡선의 임계점과 일치하며 임계 농도는 Kynch이론에 따라 임계점 S'에서의 접선이 높이  $H_c$ 과 만난점  $H_c$ 에서 결정된다. 한편, 임의의 시간  $t_a$ 에서 슬러지의 평균농도 층의 높이  $H_c$ 는 다음의 식 (8)로 표시될 수 있다.

$$H_c = U(C_c) t_a \quad (8)$$

여기에서  $U(C_c)$ 는 농도  $C_c$ 인 슬러지 층의 상승 속도이며  $H_c$ 에서의 접선이 만난점 W에서 원점을 통하는 직선



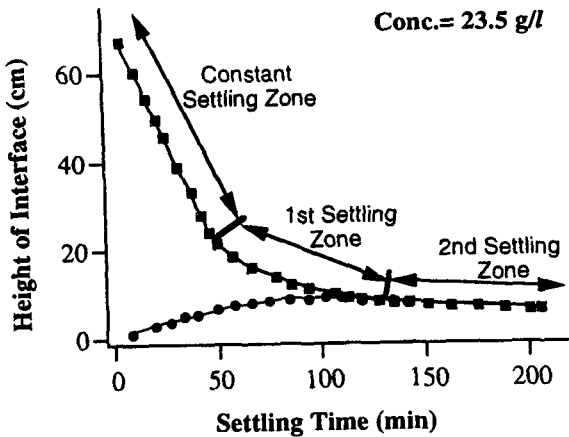


Fig. 5. Representation of a typical batch settling curve of  $\text{CaCO}_3$ -water system as a function of time.

### 3.2 실험방법

실험에 사용된 슬러리의 농도를 알기 위하여 미리 농도측정곡선을 만들어 놓는 것이 필요하다. 실험에 사용되는 탄산칼슘 분말 일정량을 무게를 단 후, 10ml mess cylinder에 넣어, 물과 섞은 다음 세게 흔들어서 하루 이상 방치한 후에, 침전된 탄산칼슘의 부피를 읽는다. 탄산칼슘 무게의 변화시켜 가면서 위와 같은 과정을 되풀이하면, 탄산칼슘의 농도와 슬러리 단위부피에 대한 침전된 탄산칼슘의 부피와의 관계를 얻을 수 있다. 이로부터 농도측정곡선을 작성할 수 있으며, 실험에서 채취한 샘플을 같은 방법으로 하루 이상 방치한 후에 침전된 부피를 읽으면, 농도측정곡선으로부터, 실험에 사용된 슬러리의 농도를 구할 수 있다. 실험에 사용된 탄산칼슘 분말은 국산(우신화학)으로 순도 97%, 비중 1.29, 벌크밀도  $0.6\text{g/cm}^3$ , 및 200mesh 이하의 입도를 가진 것으로서 구입한 그대로 사용하였다.

연속식 또 반연속식 침전탑에서의 급송유량, 밀층흐름, 급송농도 등이므로 이들의 변화에 따라 침전탑이 다르게 응답하게 된다. 먼저 충분히 교반된 슬러리를 슬러리 탱크에서 급송탱크로 펌프로 올린 후에 by-pass를 사용하여 유량을 조절한 다음 일정한 유량속도로 급송한다. 이 때 같은 농도의 슬러리를 미리 침전탑에 채워 놓고 시작하도록 한다. 연속식으로 조절할 때는 일류와 밀층흐름을 슬러리 탱크로 되돌리는 폐쇄회로로 하고 반연속식일 때는 일류와 밀층흐름을 따로 받아 내도록 하는 개방회로가 되도록 하였다. 같은 농도의 슬러리를 슬러리 탱크에서 취하여 회분식 실험을 병행하도록 하였다. 연속식 실험은 폐쇄회로일 때 급송 속도가 시간에 따라 연속적으로 변하게 되므로 그 영향을 관찰해 보도록 했다. 샘플 채취는 10ml mess cylinder를 사용하여 각 샘플 채취구에서 1~3초 짧은 시간 내에 받아 내어, 침강하는 고체 입자들이 샘플에 미치는 영향을 적게 하고, 샘플을 채취하기 전에 샘플 튜브에 미리 들어 있던 슬러리는 완전히 제거한 후 샘플을 받도록 하였다.

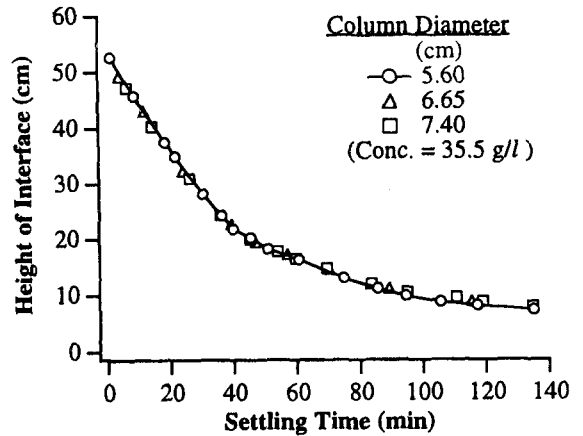


Fig. 6. Batch settling curves of  $\text{CaCO}_3$ -water system with several different tank areas for a slurry of a fixed concentration.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 회분식 침강 실험

고체 분말-물 혼합계에서 고체 입자들의 농도가 매우 낮아서 아주 묽은 슬러리의 경우에는 슬러리 층과 맑은 윗물간의 뚜렷한 경계면은 관찰되지 않고 이른 부분에서 말한 자유침강 영역의 침전 현상이 관찰되었다. 한편 시간의 경과에 따라 침전탑의 바닥에서부터 생긴 슬러지층이 시간의 경과에 따라서 위로 상승하여 올라오는 것이 관찰되었다. 그러나, 슬러리의 농도가 점차로 증가하여 고형분 농도가  $10\text{g/l}$ 의 근처에 이르면서 부터는 경계면이 희미하게 생기는 것이 관찰되었고 이 경계면이 시간이 지남에 따라 낮아하였다. 슬러리의 농도가 더욱 증가하여 고형분 농도가  $20\text{g/l}$ 을 넘어서면, 경계면이 명확하게 생기는 것이 관찰되는 반면에 침전탑의 바닥에서부터 생겨 상승하는 침전층의 시간에 따른 높이 변화는 육안으로 관찰하기가 힘들었다.

Fig. 5는 탄산칼슘의 초기 농도  $23.5\text{g/l}$ 인 슬러리에 대하여 초기 높이 70cm에서부터 시작하여 침강 시간에 따른 슬러리-윗물간의 경계면의 높이 변화를 나타낸 회분식 침강곡선이다. 그림에서 보아 잘 알 수 있듯이 초기의 낙하속도는 시간에 따라 일정하지만 약 45분이 지나면서 부터는 경계면의 낙하속도가 급격히 줄어드는 것이 관찰된다. 한편 이 부분의 침강 특성은 비압축성 입자들과는 달리 임계점을 지나서도 침강속도가 곧바로 영이 되지는 않으며 다시 두 구간의 침강 특성 영역, 즉, 1st settling zone으로 표시된 구역 침강 영역과 2nd settling zone으로 표시된 압축침강영역으로 나뉘어지는 것을 볼 수 있다(Schannon and Tory, 1965; Schannon and Stroupe, 1963; Schannon and Dehass, 1964) 또한 Fitch(1966)등에 의해 발표되고 Holdich(1955) 등에 의해 더욱 자세하게 연구된 바 있는 편류현상(channelling)을 이 압축 침강 영역에서 관찰할 수가 있었는데, 침전탑의 벽면에서 관찰되는 편류 현상은 압축영역의 침강 특성이 나타나기 바로 전부터 수직 형태로 일어나는 것을 알 수 있었다. 편류현상은

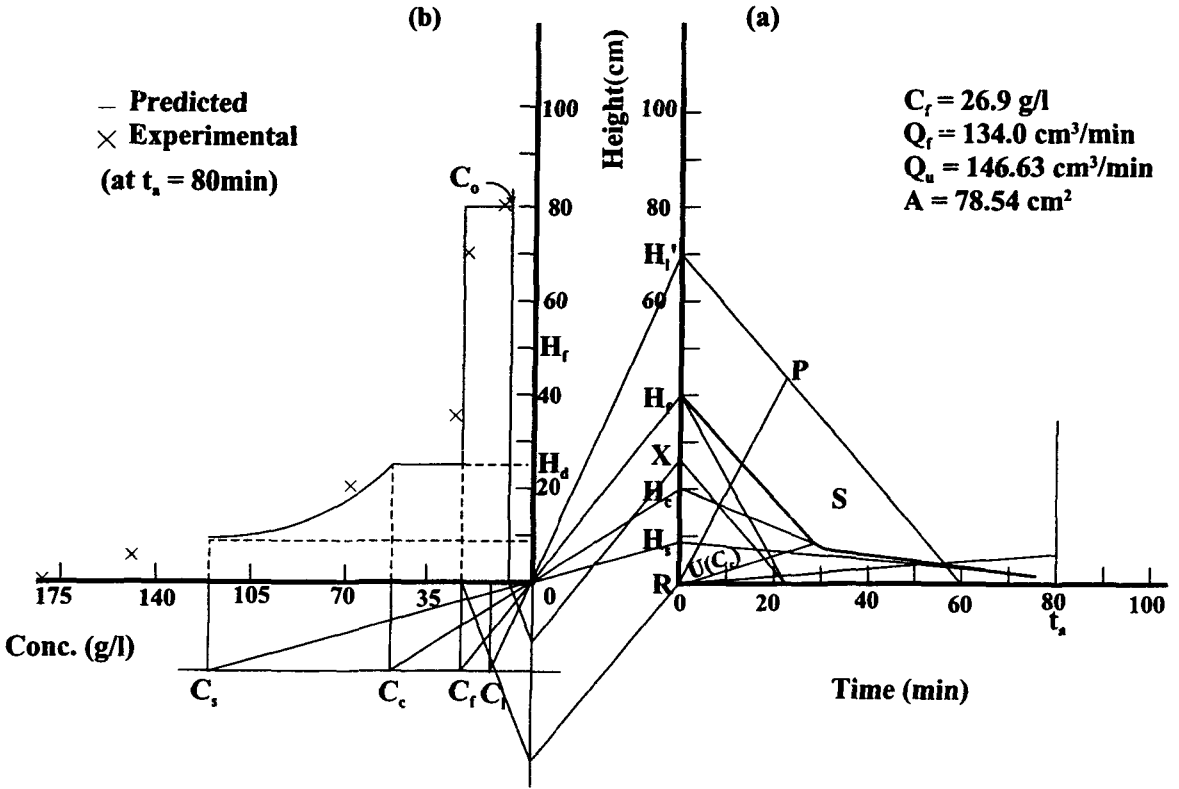


Fig. 7. Graphical analysis and comparison with experimental data of a semi-continuous settling tank which is operating at the overloading condition for the  $\text{CaCO}_3$ -water system.

슬러리 내부를 통과하는 공기 방울의 누출이나 (Glasrud et al., 1993) 침강촉진제 등의 투입(Harris et al., 1975)에 의해 인공적으로도 생기지만 본 실험에서 보이는 바와 같은 탄산칼슘-물의 시스템에서처럼 자연적으로 형성 될 수도 있다(Kammermeyer, 1941). 한편 슬러리의 초기 농도가 클수록 더 일찍 channelling이 생기며, 침전 시간이 더 지남에 따라 침전층의 윗면이 화산 분화구 모양의 생성으로 인해 울퉁불퉁해져 가는 것으로 미루어보아 침전층 내부에도 곳곳에 편류가 생기는 것을 유추할 수 있다.

침전탑의 단면적으로 인한 침전탑 벽면과의 간섭 현상이 슬러리의 침강 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 침전탑의 단면적을 몇 가지로 바꾸어 가면서 행한 실험 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 보아 잘 알 수 있듯이 침전탑의 단면적이 일정 면적을 넘어서게 되면 침전탑 벽면의 영향은 거의 무시할 수 있을 것으로 생각된다. Kammermeyer(1941)에 의해 연구된 바 있는 침전탑 벽면의 영향은 본 실험에 사용된 슬러리에 대해서도 그대로 적용될 수 있으리라 생각되지만 그림에서 보듯이 내경 5.60cm 이상의 단면적을 가지는 침전탑에 대해서는 벽의 영향을 거의 무시할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 침전탑 벽면의 영향을 무시할 수 있을 정도의 침전탑에 대해서는 슬러리의 초기 높이의 변화는 침강특성에 별로 영향을 미치지 못

하므로 이 것은 조업상의 안정성에만 관계 있을 뿐이고, 침강 특성에 영향을 미치는 인자로는 단면적으로서 이는 침전탑의 용량을 결정하기 위한 중요한 변수가 됨을 알 수 있다.

#### 4.2 반연속식 침전탑의 실험적 해석

##### 4.2.1 과하중 조업

급송농도  $C_r=26.9\text{g/l}$ ,  $Q_r=134.0\text{cm}^3/\text{min}$ 이며 밀층 흐름을 없게 하여 실험을 시작한 후, 80분 후에 샘플을 취하고 다음에  $Q_u=146.63\text{cm}^3/\text{min}$ 의 유속으로 슬러지를 배출시켰다. 같은 농도의 슬러리에 대한 회분식 침강 곡선을 구하고 이로부터 작도법에 의한 반연속식 침전탑의 해석 결과와 실험 데이터와의 비교 결과를 Fig. 7에 함께 표시하였다.  $Q_r/A$ 에 해당하는 급송속도가  $C_r$ 에서의 슬러리의 침강속도보다 빠르므로 과하중 조업이 되며 슬러리 내의 일부 고체입자들은 일류에 섞여 나가게 된다. 이의 농도  $C_o$ 는 식 (12)에서 보인 바와 같이 Fig. 7(a)로부터 높이 비로부터 구하면,  $C_o = C_r(H_r X / H_1 R) = 26.9(13.0/39.7) = 8.8\text{g/l}$  이 된다. 한편, 실험치는  $7.2\text{g/l}$ 의 값을 보여 주었으며 이는 대체로 근사한 값으로서 다른 실험 데이터들도 Fig. 7(b)에서 보아 잘 알 수 있듯이 이론치와 거의 일치함을 알 수 있다.

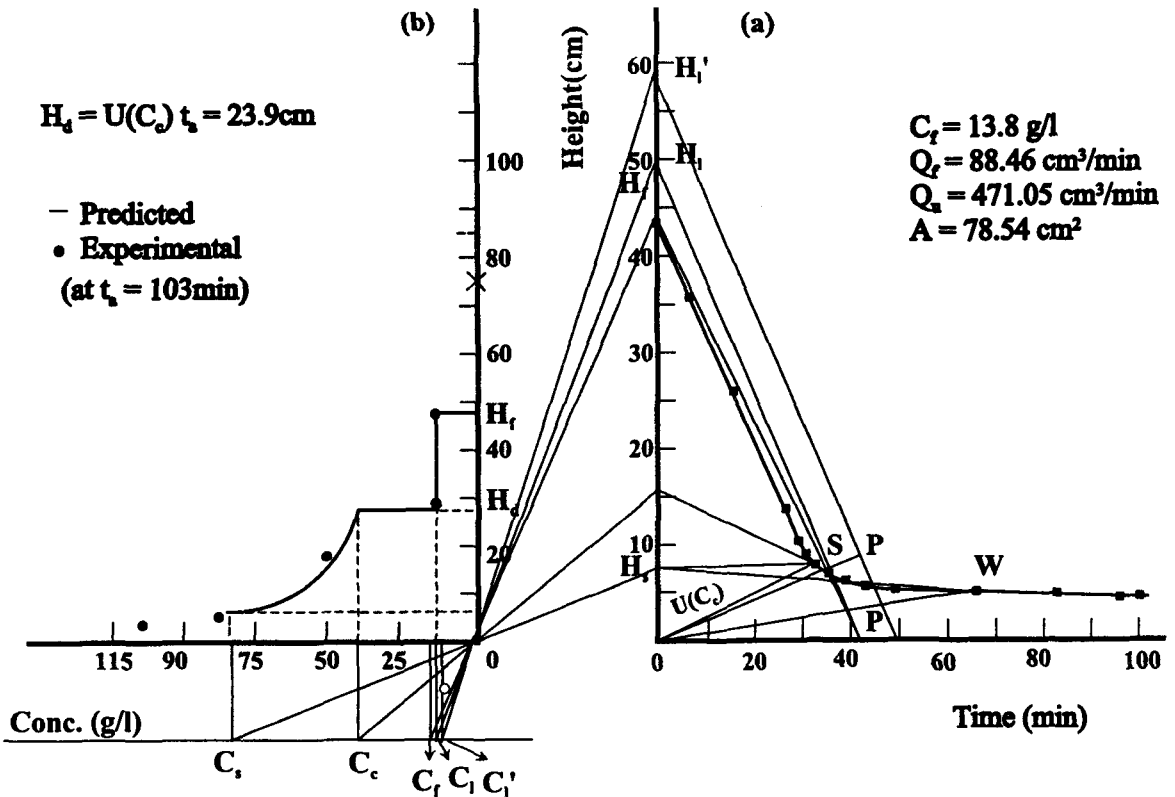


Fig. 8. Graphical analysis and comparison with experimental data of a semi-continuous settling tank which is operating at the underloading condition for the  $\text{CaCO}_3$ -water system with system with concentration of  $13.8\text{g/l}$  and volumetric feed rate of  $88.46\text{cm}^3/\text{min}$ .

#### 4.2.2 저하중 조업

급송농도  $C_r=13.8\text{g/l}$ ,  $Q_r=88.46\text{cm}^3/\text{min}$ 이며 밀층흐름을 없게 했을 때 회분식 침강실험을 통해 얻어진 곡선으로부터 더 구한 반연속식 침전탑의 조업점은 Fig. 8(a)에서 P로 표시된 바와 같다. 그림에서 보듯이 급송속도가  $C_r$ 에서의 침강속도보다 느리므로 저하중 조업이 된다. 처음에 침전탑에 슬러리를 미리 채운 후 조업을 시작한 뒤 103분만에 회분식 침강곡선 Fig. 8(a)로부터 침전탑 내부를 해석하고 실험치와 비교한 것을 Fig. 8(b)에 나타내었다.

$Q_r/A$ 의 침강속도에 해당하는 슬러리의 농도를  $C_1$ 이라 하면  $C_1 > C_r$ 이며  $C_r$ 와  $C_1$ 은 Fig. 8(b)에서 보이는 바와 같이 표시된다.  $C_r$ 의 이론값과 실험값은 각각  $13.1$  및  $12.0\text{g/l}$ 로서 서로 근사한 값을 나타내었다. 한편, 103분 후의 농도와 임계농도와와의 불연속면의 높이  $H_d$ 는 회분식 침강 곡선에서의  $U(C_r)$ 와 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$H_d = U(C_r, t_r) = (0.232)(103) = 23.90\text{cm}$$

슬러리 농도가 묽은  $13.8\text{g/l}$ 의 경우 바닥에서부터 슬러지층이 생성되어 상층을 관찰할 수 있었는데, 103분 후의 실제 높이는  $22.80\text{cm}$ 이었다.

한편, 위에서 계산된 값들을 이용하여 밀층 흐름의 평

균 농도 ( $C_u$ )를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_u = C_r Q_r / f Q_u \\ = (13.8)(88.46) / (0.037)(471.05) = 70\text{g/l}$$

실제의  $C_u$ 값은  $94.0\text{g/l}$ 의 값을 보여주었다. 따라서  $Q_r = 88.46\text{cm}^3/\text{min}$ 인 경우의 저하중 조업은 Fig. 8에서 보듯이 이론치와 실험치와 상당히 잘 부합함을 알 수 있었다. 그러나, 급송농도  $11.7\text{g/l}$ 이며, 급송농도가  $82.65\text{cm}^3/\text{min}$ 일 때의 이론치 및 실험 결과를 Fig. 9에 나타나 있는데 이 경우에는 정속 침강 구역의 해석은 앞의 경우와 별 차이 없이 잘 맞으나, 슬러지층을 해석한 데에는 상당한 오차가 있음을 알 수 있다. 즉, 조업시작 190분 후의 슬러지층 농도가  $90\text{g/l}$ 되는 슬러지층의 높이  $H_d$ 를 비교해보면 이론적으로  $10\text{cm}$ 이지만 실제 실험 값으로는 약  $20\text{cm}$ 로 높게 나타난 것을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 다음에 설명하는 Fig. 10에서 보이는 급송 속도선의 기울기 때문에 나타나는 현상으로서 Kynch이론을 적용하는 침전탑 설계에서의 중요한 오차 원인으로 작용할 가능성이 있을 것으로 생각된다.

앞에서의 Fig. 8과 Fig. 9의 다른 점은의 급송선이 회분식 침강곡선의 임계점에서 얼마나 떨어진 곳에서 곡선과 만나느냐 하는 것이다. Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)를 비교해 보아 알 수 있듯이 Fig. 9(a)에서의 급송선은 회분식 침강 곡선의 임계점과 상당히 떨어진 곳에서 곡선과

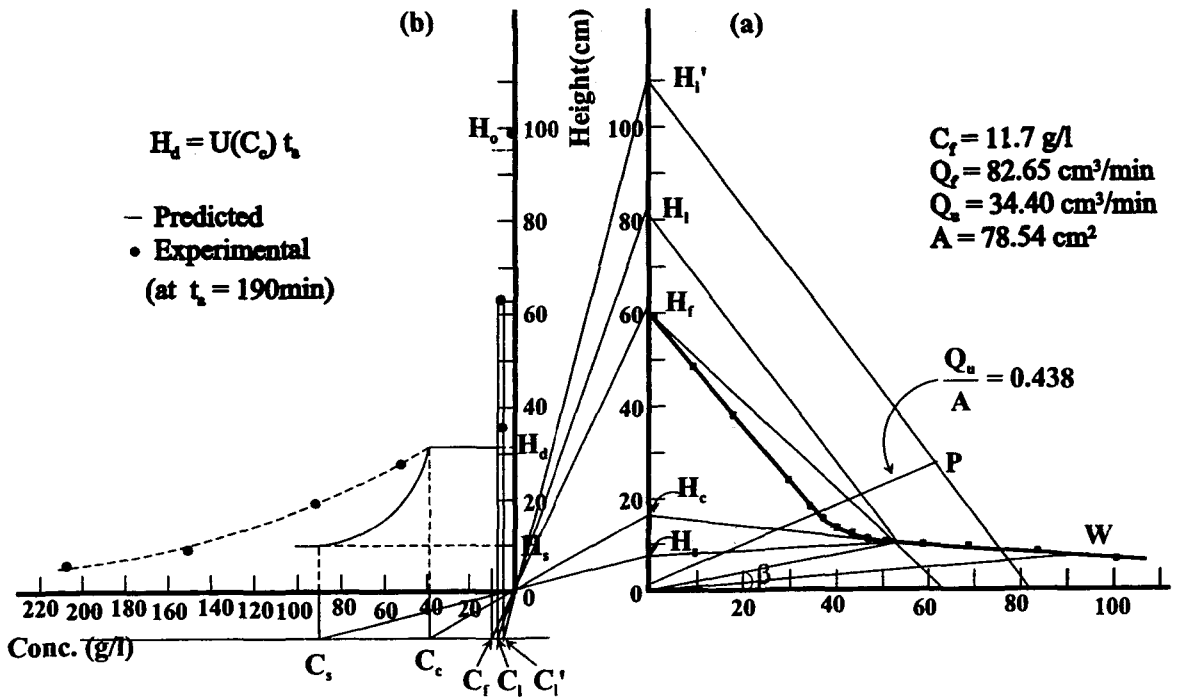


Fig. 9. Graphical analysis and comparison with experimental data of a semi-continuous settling tank which is operating at the underloading condition for the  $\text{CaCO}_3$ -water system with concentration of  $11.7\text{ g/l}$  and volumetric feed rate of  $82.65\text{ cm}^3/\text{min}$ .

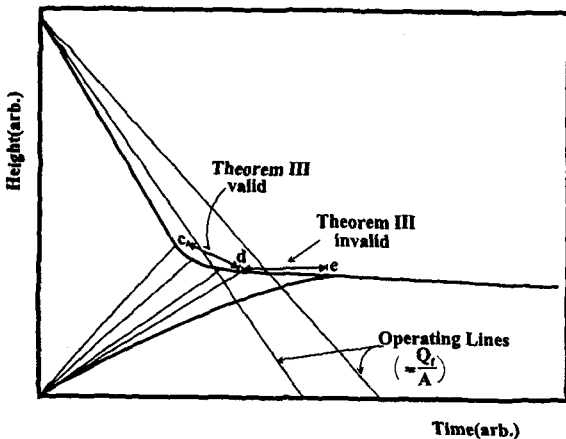


Fig. 10. Batch settling curve of a typical compressible particles showing the zone settling region in which Theorem III is valid and invalid.

만나는 것을 볼 수 있다. 즉,  $Q_r/A$ 의 급송 속도선의 기울기에 따라 해석과 실험에 차이가 생기는 것이며 이러한 차이점은 Fig. 10을 참고로 하여 그 원인을 고찰해 볼 수 있다. 비 압축성 입자들의 경우, 침전시에 입자들은 침전탑의 바닥에  $C_c$ 의 농도로 쌓이게 되고, 그 즉시 플럭스는 영이 된다. 그러나, 압축성 입자들의 경우에는 압축 침강 영역의 위 부분의 입자들은 계속 침전하므로

침강 속도는 즉시 영이 되지 않으며 따라서 플럭스도 곧바로 영이 되지 않는다는 것은 압축 영역의 위 부분이 선형으로 형성되지 않고 시간에 따라 속도가 감소하는 어떤 기울기를 가지면서 형성된다는 것을 의미한다. 따라서 같은 구역 침강 영역에서도 압축 영역의 위 부분에서부터 시작하여 어떤 기울기를 가지면서 형성되는 부분이 있고, 이 부분은 Fig. 10에서  $d \sim e$ 구간에 들게 되면 같은 구역 침강이지만 Kynch이론 III의 제한 조건을 완전히 만족시키는  $c \sim d$ 구간에서 보다 많은 오차를 범하게 된다. 따라서 Fig. 8과 Fig. 9에서의 급송선이 각각  $c \sim d$ 구간과  $d \sim e$ 구간에 위치하기 때문에 같은 저하중 조작의 경우에도 상이한 결과가 생긴 것이라고 생각된다. 결국 Obata와 Wadanabe가 제시한 이론도 그들이 밝히지는 않았으나 위에서 말한 바와 같이 상당한 제약 조건을 포함하고 있음을 알 수 있다. 실제에 있어서는 회분식 실험이 간단하고 이를 이용하는 것이 편리하기는 하지만 위의 실험 결과를 고려한다면 Fig. 9에서의 조건과 같은 경우에는 많은 오차 범위를 허용해야 할 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

탄산칼슘-물 이성분계에서 슬러리 중의 탄산칼슘 고형물의 침강 특성을 회분식으로 조사하고 침전탑의 높이 및 단면적이 침강 특성에 미치는 영향을 관찰하였다.

1) 슬러리의 침강 특성은 초기 슬러리 높이에는 거의 무관하며, 또한 침전탑의 단면적이 일정면적 보다 크면



참 고 문 헌

침전탑 벽면이 침강 특성에 미치는 영향을 무시할 수 있음을 알 수 있었고 이로부터 슬러리의 초기 높이는 침전탑 조업상의 안정성에만 관계되며, 침전탑의 용량 결정에는 대부분의 경우 단면적이 더 중요한 변수임을 알았다.

2) 이러한 회분식 침전실험을 바탕으로 하여 침전탑이 반연속식으로 조업될 때의 결과를 회분식 침강 특성 곡선으로부터 도해법으로 해석하고 이를 실험 결과와 비교 관찰하여 몇 가지 새로운 같은 결론을 얻을 수 있었다. 즉, 압축성 입자들의 침강시에는 압축 영역의 윗부분의 변화가 선형적으로 이루어지지 않으며 시간에 따라 속도가 감소하는 어떤 기울기를 가지면서 형성된다. 따라서 반연속식 침전탑의 조업조건이 이 영역에 들면 이론과 실험값 간에 비교적 큰 오차를 나타내는 것이 발견되었다.

3) 또한 Obata와 Wadanabe가 제시한 이론도 과하중 조업과 급송속도가 거의 임계 속도에 가까운 저하중 조업의 경우에는 잘 적용되었으나 임계속도보다 상당히 늦은 급송 속도의 저하중 조업의 경우에는 슬러지층을 해석하는 데에 있어서 많은 오차를 나타내는 것을 알 수 있었으며 따라서, 실제에 있어서는 회분식 실험이 간단하고 이를 이용하는 것이 편리하기는 하지만 상당한 제약 조건을 포함하고 있으므로 조업 조건에 따라서는 많은 오차 범위를 고려해야 한다는 것을 알 수 있었다.

Coe, H. S. and Clevenger, G. H., 1916, *Trans. AIME*, 55, 356  
 Comings, B. I., 1940, *I&EC Fund.*, 5, 663  
 Fitch, B. I., 1966, *I&EC*, 58, 19  
 Font, R., 1991, *Chem. Eng. Sci.*, 46, 2473  
 Glasrud G. G., Navarrete, R. C., Scriven, L. E. and Macosko, C. W., 1993, *AIChE J.*, 39, 560  
 Harris, C. C., Somasundaran, P. and Jensen, R. R., 1975, *Powder Technology*, 11, 84  
 Holdich, R. G. and Butt, G., 1995, *Trans. IChemE*, 73, 833  
 Kammermeyer, K., 1941, *I&EC*, 33, 1484  
 Kynch, G. J., 1952, *Trans. Faraday Soc.*, 48, 166  
 Obata, E. and Wadanabe, H. 1979, *J. Chem. Eng. Japan*, 12, 307  
 Shannon, P. T. and Tory, E. M., 1965, *I&EC*, 57, 19  
 Shannon, P. T., Stroupe, E. and Tory, E. M., 1963, *I&EC Fund.*, 2, 203  
 Shannon, P. T., Dehass, R. D. and Tory, E. M., 1964, *I&EC Fund.*, 3, 250  
 Talmage, W. P. and Fitch, E. B., 1965, *I&EC Fund.*, 4, 194  
 Tiller, P. M., 1981, *AIChE J.*, 27, 823