

## 정수장슬러지의 전처리에 의한 침전특성

### Settling Characteristics of Water Treatment Plant Sludges by Pretreatment Methods

문용택\* · 이선주

Moon, Yong-taik\* · Lee, Sun-ju

한국수자원공사 수자원연구원

(2008년 9월 23일 접수; 2008년 11월 17일 수정; 2008년 11월 20일 채택)

#### Abstract

It is necessary to investigate methods for improvement by diagnosing sludge settling characteristics on inflow of slurry to thickener. The results of the settling tests are correlated to determine zone settling velocities at the various sludge solids concentrations. Conditioning of WTP residuals is generally done by either chemical or physical treatment.

The settling test was conducted with 1m columns dosing polymer to WTP residuals at various solids concentration. The estimated results for dosing to WTP residuals for a sludge of 2,100 ~ 16,012 mg/L solids concentration were the zone settling velocities of 48.38 ~ 6.8 m/day, supernatant solid concentration of 3.2 ~ 19 mg/L and solid flux of 101.6 ~ 317.61 kg/m<sup>3</sup> · day. The values for non-polymer treatment were the zone settling velocities of 28.37 ~ 0.12 m/day, supernatant solid concentration of 8.5 ~ 108 mg/L and solid flux of 59.58 ~ 1.92 kg/m<sup>2</sup> · day. The limiting solid flux value by Yoshioka methods was 4.0 kg TS /m<sup>3</sup> · day for Non-polymer and 228.0 kg TS /m<sup>3</sup> · day for dosing polymer. These results are to indicate a possibility of improvement on the thickening characteristics and the quality of supernatant as increasing the settling velocities by dosing polymer to WTP residuals.

**Key words** : zone settling velocities, sludge solids concentrations, solid flux

**주 제 어** : 계면침강속도, 슬러지고형물농도, 고형물부하

#### 1. 서론

농축방식에는 회분식과 연속식 두가지 방법이 있다. 회분식은 배출슬러지에서 슬러지가 간헐적으로 배출되는 경우나 처리해야 할 슬러지가 소량인 경우에 이용되는 방식이다. 연속식은 배출슬러지 등에서 슬러지가 연속적으로 배출되는 경우나 처리슬러지가 다량인 경우에 이용되는 방식이다.

배출수처리시 발생하는 고형물량 산정과정에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 원수탁도는 연중 상당히 큰 변화폭을 나타내기 때문에 배출수처리시설의 설계탁도는 연간일수의 95%이상 발생하는 탁도를 채택하고 있다. 우리나라의 강우 형태를 분석해 보면 대체적으로 연평균 탁도의 4배 값 이하의 탁도로 발생하는 일수가 연간일수의 95%이상을 점하기 때문에 이에 근거하여 설계탁도는 평균탁도의 4배를 산정하

\*Corresponding author Tel: +82-42-870-7552, Fax: +82-42-870-7549, E-mail: ytmooon@kwwater.or.kr (Moon, Y.T.)

고 있다. 이러한 사실로 인해 평상시에 평균탁도를 갖는 원수가 유입될 때 설계탁도로 산정된 시설용량이 과다해져 슬러지의 체류시간이 길어지고 설계탁도를 초과하는 고탁도 유입시에는 배출슬러지에서 농축조로 유입되는 슬러지의 발생량이 많아져 시설용량이 부족해지며 슬러지의 침강성이 매우 불량하게 나타난다. 따라서 원수내 유기물이 많이 포함된 경우와 고탁도 유입시에는 슬러지의 침강성 불량으로 상징수 처리가 어렵게 되어 수처리 전공정에 악영향을 미칠 수 있다. 농축슬러지의 농도가 높으면 탈수효율이 향상되어 케이크의 함수율을 저감 시킬 수 있다. 농축성이 특히 불량한 경우 또는 고탁도일 경우 호소수를 수원으로 하는 슬러지는 농축조의 체류시간을 48시간 이상으로 하여도 경험적인 사례로 봤을 때 그다지 농축효과가 높아지지 않는다. 농축성이 특히 나쁜 경우에는 응집처리로 농축전처리하거나 고형물부하를 줄여 운전하는 방법도 있다. 응집처리는 고분자응집제를 사용하여 슬러지의 농축성을 높이는 과정이다(상수도시설기준, 2004).

“농축조의 소요면적은 청징조건을 만족하는 면적과 농축조건을 만족하는 면적들을 처리대상 슬러지의 침강농축 실험을 통해 계산해서 그 중 큰 값을 취한다. 여기에서 청징조건을 만족하는 면적이란 농축조내 슬러지가 침강할 수 있는 상승유속 이하를 유지하는데 필요한 수평단면적을 말하고 농축조건을 만족하는 면적이란 농축해서 침강속도가 느려진 슬러지를 하부로 지체 없이 이행시키도록 하기 위해서 필요한 수평단면적이다.”라고 표현하고 있다(일본 수도시설설계지침, 2000).

슬러지 침전 실험은 다양한 크기의 침전조를 이용하여 측정할 수 있으나, 동일한 농도에서도 침전조의 직경에 따라 슬러지 침전속도가 변한다. 슬러지 침전실험장치를 표준화하기 위해 많은 연구가 진행되었으며, 그 결과를 종합하여 다음과 같은 침전실험 방법을 제시하고 있다 (vesilind, 1979).

- 침전조의 직경은 최소한 20cm 이상이어야 한다.
- 침전조의 높이는 실제 농축조 높이와 같아야 하며, 부득이 짧은 관을 사용하는 경우 최소한 90cm 이상되어야 한다.
- 슬러지는 침전조 하부로 주입해야 한다.
- 침전조에는 슬러지층을 교반할 수 있는 장치가 있어야 하며, 20cm 관을 사용하는 경우 회전 속도는 0.5 rpm 이 적당하다.

한편 직경이 큰 침전조를 사용하는 경우 슬러지 침전실험에 매우 많은 양의 슬러지가 필요하다.

Solid flux는 두 가지 운동성에 의해 정의된다. 첫째는 농축조 하부에서 슬러지의 제거로 인해 유발되는 bulk downward movement이다. 슬러지의 하부배출로 인한 연

속적인 고형물의 운동은 농축조 안에 하나의 속도를 형성한다. 이것을 플릭스 개념으로 표현하면  $G_u = uC_i$ 이다. 여기서  $u$ 는 고형물의 하부속도,  $C_i$ 는 농축조 내 점  $i$ 를 지나는 고형물 농도를 의미한다. 두 번째는 농축조 내 고형물의 침강성에 기인한다. 고형물은 침강이론에 따라 침강하며, 만약 고형물이 침강하지 않는다면 농축은 일어날 수 없다. 이 운동성을 플릭스 개념으로 표현하면  $G_b = v_i C_i$ 이다. 여기서  $v_i$ 는  $C_i$ 에서의 batch settling 속도이다. 그러므로, 점  $i$ 에서 총 solid flux는 슬러지 배출로 인한 flux와 batch settling flux의 합이 된다. 즉,  $G_i = uC_i + v_i C_i$ 이며, 이 solid flux는 고형물부하와 동일한 차원을 갖는다(Dick, 1972 ; Cho, 1993 ; Metcalf & Eddy, 1991; Cornwell, 1999).

본연구에서는 슬러지의 농도별(2100 ~ 16,012 mg/L) 최적 약품주입량을 결정하여 이를 근거로 1 m 침전관에서 약품주입에 따른 슬러지의 농도별 침전속도, 상등수의 NTU, 고형물부하값과 한계고형물값을 구하여 최적약품을 주입후 300분 동안 시간별 계면높이를 측정하여 침강속도를 근거로한 고형물부하값을 산정하고, 약품처리에 의한 슬러지의 침강속도의 증가로 농축 및 방류수의 수질개선 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

표준화된 방법에 따라 침전실험 장치를 제작하였으며 실



Fig. 1. Zone settling apparatus.

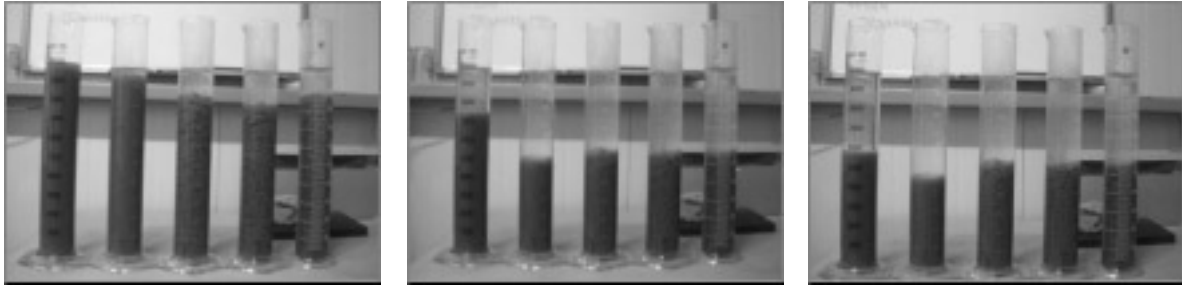


Fig. 2. Determination of optimum polymer dosage for a sludge of 3,597 mg/L solids concentration(from left, 0 min, 10 min, 60 min).

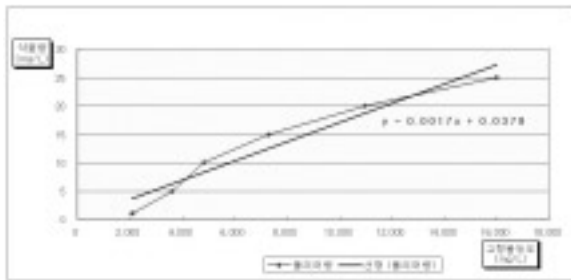


Fig. 3. Determination of polymer dosage on sludge solids concentration.

험장치의 실물 사진은 Fig.1과 같다. 실험에 사용된 침전조는 아크릴재질이며, 높이 150cm, 내경 26cm의 원형 실린더로 제작하였다. 벽면효과를 방지하기 위하여 1cm/sec 정도로 회전하는 교반기를 침전조 내부에 설치하였다(Fig. 1).

침전속도는 계면의 위치를 시간에 따라 측정 한 다음 초기의 일정한 기울기를 갖는 영역으로부터 계산하였다. 각 초기 농도별 고액계면의 침전속도를 측정하여 고액계면의 침전속도 곡선을 작성하였으며, 최종적으로 고형물 농도에 대한 고형물 플럭스(solid flux)곡선을 작성하였다. 여기서, 고형물 플럭스(kg/m<sup>2</sup>/day) 고형물 농도(kg/m<sup>3</sup>)와 침전속도(m/day)의 곱으로 정의된다. 이렇게 작성된 고형물 플럭스 곡선으로부터 Yoshioka의 도식적인 방법을 이용하여 SF<sub>L</sub>를 구하였다. 농축조 하부로 배출되는 농축슬러지의 고형물 농도값에 해당하는 x-축위치에서 고형물 플럭스 곡선에 접하는 직선을 그었을때 이 직선이 y-축과 만나는 점이 SF<sub>L</sub>이다 (Yoshioka, 1957 ; Metcalf & Eddy, 1991).

본연구에서는 Vesilind가 제안한 침전실험방법으로 슬러지의 침전속도를 측정하였다. 본 연구에 사용한 정수 슬러지는 연구대상인 C 정수장에서 발생된 슬러지를 채취하여 사용하였다. 여러 가지 고형물농도를 갖는 정수슬러지의 침전속도를 측정하기 위하여 정수 슬러지에 물을 첨가하여 고형물의 농도를 조절하였다. 본연구에서 폴리머의 최적 약품 주입량을 결정하기 위해 자테스트를 실시하고 침전속도 및 농축 정도에 따라 약품 주입량을 결정하였으며 정수 슬러지는 약품을 주입 했을때와 무처리일때의 비교를 하였다. 본 실험

에 사용된 고형물 농도는 TS 2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L 였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 약품주입량 결정을 위한 자-테스트

약품주입량을 결정하기위해 자-테스트를 수행하였으며, 각각의 슬러지의 농도에 대한 약품주입량을 달리하면서 각각에서 100rpm으로 교반하였으며, 교반후 1 L 메스실린더에 넣어 10분, 30분, 1시간 체류후의 계면높이를 측정하여 부피가 최소가 되는 지점을 최적주입량으로 하였으며, 그중 하나인 슬러지의 농도가 3597 mg/L에서의 농축실험을 Fig. 2에 나타내었다. 고형물 농도 2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L에서 각각의 최적 약품주입량은 1, 5, 10, 15, 20, 25 mg/L로 농도 x에 대한 약품주입량 y의 관계식  $y = 0.0017x + 0.0371$ 로 나타났다(Fig. 3, Table 1).

#### 3.2. 약품주입에 따른 침전특성

자테스트에 의한 농도별 최적약품주입량에 근거하여 1 m 침전관에서 고형물 농도가 2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L의 슬러지에 대하여 각각 5시간동안 일정시간 간격으로 침전실험을 수행하여 무처리와 약품처리에 대한 침강속도 및 고형물부하를 측정하였다(Fig. 4).

침전관에 슬러지를 유입하여 무처리와 약품처리에 대한 체류시간별 계면높이를 측정하였으며, 300분 동안의 최종 계면높이는 고형물 농도가 2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L에서 무처리시에는 22.5, 43.8, 54.8, 65.0, 87.3, 97.6 cm이고, 약품처리시에는 21.2, 31.6, 35.8, 47.4, 58.1, 81 cm로 무처리보다 약품처리한것이 계면높이가 낮게 나타났고, 고형물 농도가 높을수록 압밀에 의

Table 1. Determination of polymer dosage on sludge solids concentration

| solids concentration(mg/L) | 2,100 | 3,597 | 4,820 | 7,320 | 10,998 | 16,012 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| polymer dosage (ppm)       | 1.0   | 5.0   | 10    | 15    | 20     | 25     |

solids concentration(mg/L)



2,100



3,597



4,820

solids concentration(mg/L)



7,320

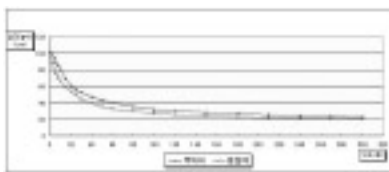


10,998

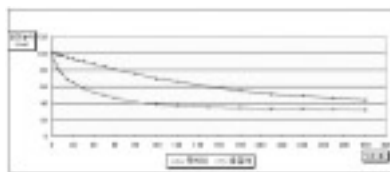


16,012

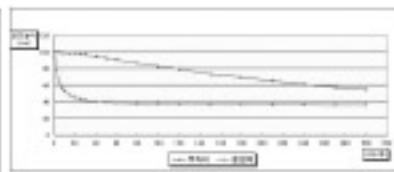
Fig. 4. Interfacial height for a various solids concentration with the polymer dosage at the settling time of 10 s(left) and 300 min(right) in Photograph.



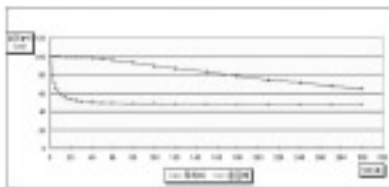
2,100 mg/L



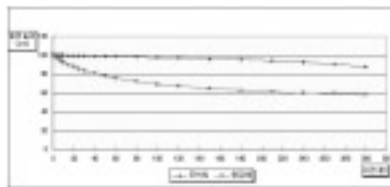
3,597 mg/L



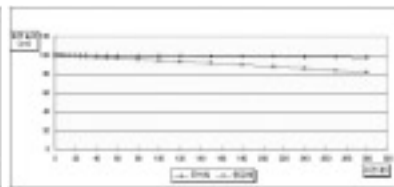
4,820 mg/L



7,320 mg/L



10,998 mg/L



16,012 mg/L

Fig. 5. Settling curves for a sludge of 2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L solids concentration with the polymer dosage.

한 최종 계면높이가 높게 나타났다(Fig. 5).

수질개선에 대한 실험을 수행하였으며, 무처리와 약품처리에 대한 슬러지의 농도(2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L)별 상등수의 수질변화를 측정된 결과 무처리시

8.5, 8.1, 29.0, 34.0, 41.2, 108 NTU로 슬러지의 농도가 높을수록 상등수의 수질이 불량한 것으로 나타났으나, 약품처리시 3.2, 3.0, 4.4, 7.0, 7.7, 19 NTU로 수질개선효과가 큰 것으로 나타났다 (Fig. 6, Table 2).

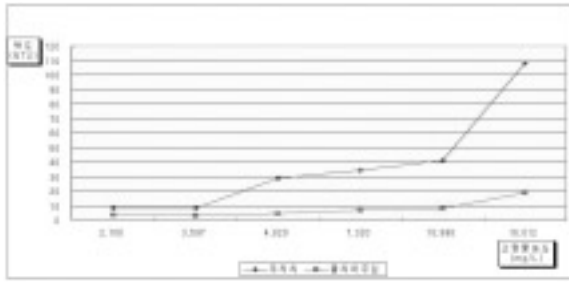


Fig. 6. Variation of Supernatant turbidity with the polymer dosage at various solids concentration.

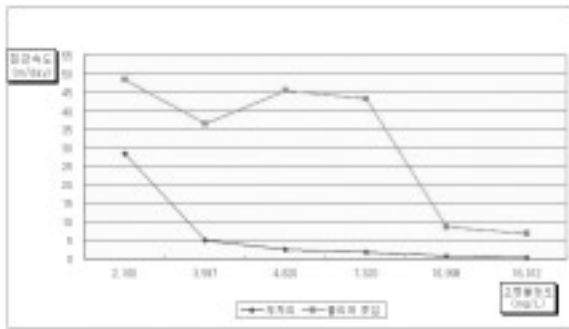


Fig. 7. Curve of settling velocity with the polymer dosage at various solids concentration.

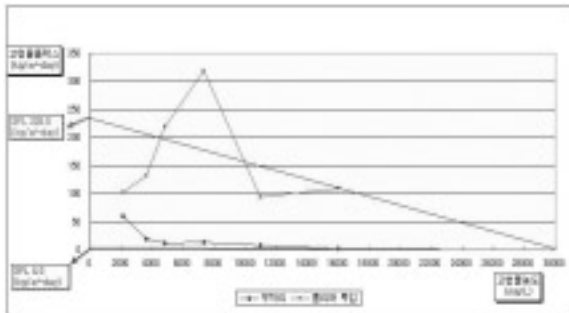


Fig. 8. Determination of limiting solid flux value by Yoshioka methods at various solids concentration.

침전속도는 무약주시 고형물 농도가 2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L에서 각각 28.37, 4.99, 2.45, 1.7, 0.61, 0.12 m/day로 정수 슬러지의 총 고형물 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 7, Table 3). 이는 여러 가지 무기물질에 대한 침강특성 연구에서 슬러지의 농도가 높을수록 침전속도가 늦어진다는 보고와 일치하였다(Islam, M. A., 1998). 특히 농축조로 유입되는 슬러지의 농도가 16,012 mg/L인 고농도인 경우 침강속도는 0.12 m/day로 매우 낮아 상등수의 하천방류를 어렵게하는 요인이 될 수 있다. 이에 대한 개선방법으로 농도별 최적 약품을 주입하여 시간별 무약주시와 동일하게 농도별 각각의 침전속도는 48.38, 36.58, 45.50, 43.39, 8.52, 6.80 m/day로 무약주에 비해 월등한 침전속도를 나타내었다(Fig. 7). 따라서 약품주입을 하면 침강속도를 증가시켜 충분한 체류시간을 확보하고, 하천방류수의 수질개선이 가능할것으로 판단된다. 또한 이러한 결과는 약품주입이 슬러지의 침강속도를 증가시킨다는 연구결과와 같은 경향을 보였다(Zhao, Y. Q., 2004).

또한 고형물부하값은 무처리시에 고형물 농도가 2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L에서 각각 59.58, 17.95, 11.81, 12.44, 6.71, 1.92 kg/m<sup>2</sup>·day로 나타났으나(Fig. 8). 약품주입시에는 101.6, 131.58, 219.31, 317.61, 93.7, 108.88 kg/m<sup>2</sup>·day로 무처리시보다 고형물부하값이 증가하였다(Fig. 8). 이는 약품처리시 고농도로 유입하더라도 침전속도를 증가시켜 방류수의 수질이 개선될것으로 판단되었다.

고형물 플럭스 곡선으로부터 Yoshioka의 도식적인 방법을 이용하여 SFL 를 구하였다(Yoshioka, 1957 ; Metcalf & Eddy, 1991). 약품처리시 슬러지 한계 고형물부하값이 무처리인 4.0 kg TS /m<sup>2</sup>·day보다 높은 고형물부하값 228.0 kg TS /m<sup>2</sup>·day 으로 나타난것은 약품처리를 하면 고농도의 슬러지가 유입되더라도 약품처리에 의한 슬러지의 침강속도의 증가로 농축 및 방류수의 처리에 효과적인 것으로 판단되며,

Table 2. Variation of Supernatant turbidity with the polymer dosage at various solids concentration

| solids concentration (mg/L)     | 2,100 | 3,597 | 4,820 | 7,320 | 10,998 | 16,012 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| turbidity with no-chemical(NTU) | 8.5   | 8.1   | 29.0  | 34.0  | 41.2   | 108    |
| turbidity with chemical(NTU)    | 3.2   | 3.0   | 4.4   | 7.0   | 7.7    | 19     |

Table 3. Characteristics of seed sludge, food waste and activated sludge

| Concentration (mg/L) | settling time(min) | settling depth(cm) | settling elocity(m/day) |
|----------------------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| 2,100                | 20                 | 39.4               | 28.37                   |
| 3,597                | 30                 | 10.4               | 4.99                    |
| 4,820                | 120                | 20.4               | 2.45                    |
| 7,320                | 180                | 21.2               | 1.70                    |
| 10,998               | 300                | 12.7               | 0.61                    |
| 16,012               | 300                | 2.4                | 0.12                    |

Table 4. Variation of settling velocity with the polymer dosage at various solids concentration

| Concentration (mg/L) | settling time(min) | settling depth(cm) | settling velocity(m/day) |
|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| 2,100                | 10                 | 33.6               | 48.38                    |
| 3,597                | 10                 | 25.4               | 36.58                    |
| 4,820                | 15                 | 47.4               | 45.50                    |
| 7,320                | 15                 | 45.2               | 43.39                    |
| 10,998               | 25                 | 14.8               | 8.52                     |
| 16,012               | 25                 | 11.8               | 6.80                     |

**Table 5.** Variation of solid flux at various solids concentration

| concentration(mg/L) | settling velocity(m/day) | solid flux(kg/m <sup>2</sup> · day) |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 2100                | 28.37                    | 59.58                               |
| 3597                | 4.99                     | 17.95                               |
| 4820                | 2.45                     | 11.81                               |
| 7320                | 1.70                     | 12.44                               |
| 10,998              | 0.61                     | 6.71                                |
| 16,012              | 0.12                     | 1.92                                |

**Table 6.** Variation of solid flux with the polymer dosage at various solids concentration

| concentration(mg/L) | settling velocity(m/day) | solid flux(kg/m <sup>2</sup> · day) |
|---------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 2100                | 48.38                    | 101.60                              |
| 3597                | 36.58                    | 131.58                              |
| 4820                | 45.50                    | 219.31                              |
| 7320                | 43.39                    | 317.61                              |
| 10,998              | 8.52                     | 93.70                               |
| 16,012              | 6.8                      | 108.88                              |

충분한 체류시간 확보에 의한 수질개선이 가능할것으로 판단된다(Fig. 8).

#### 4. 결론

본 연구는 슬러지의 농도별(2,100 ~ 16,012 mg/L) 최적 약품주입량을 결정하여 이를 근거로 1 m 침전관에서 약품주입에 따른 슬러지의 농도별 침전속도, 상등수의 NTU, 고형물부하값과 한계고형물값을 구하여 최적약품을 주입후 300 분 동안 시간별 계면높이를 측정하여 침강속도를 근거로한 고형물부하값을 산정하고, 약품처리에 의한 슬러지의 침강속도의 증가로 농축 및 방류수의 수질개선 가능성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고형물 농도가 2,100 ~ 16,012 mg/L에서의 각각의 최적약품주입량은 1 ~ 25 mg/L로 농도 x에 대한 약품주입량 y의 관계식  $y = 0.0017x + 0.0371$ 로 나타났다.
2. 무약주시 침전속도는 정수 슬러지의 총 고형물 농도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 농축조로 유입되는 슬러지의 농도가 16,012 mg/L인 고농도인 경우 침강속도는 0.12 m/day로 매우낮아 상등수의 하천방류를 어렵게하는 요인이 될 수 있다.
3. 무처리와 약품처리에 대한 슬러지의 농도(2100, 3597, 4820, 7320, 10998, 16012 mg/L)별 상등수의 수질변화를 측정한 결과 무처리시 8.5, 8.1, 29.0, 34.0, 41.2, 108 NTU로 슬러지의 농도가 높을수록 상등수의 수질

이 불량한 것으로 나타났으나, 약품처리시 3.2, 3.0, 4.4, 7.0, 7.7, 19 NTU로 수질개선효과가 큰 것으로 나타났다.

4. 약품처리시 슬러지 한계 고형물부하값이 무처리인 4.0 kg TS /m<sup>3</sup> · day보다 높은 고형물부하값 228.0 kg TS /m<sup>3</sup> · day 으로 나타난것은 약품처리를 하면 고농도의 슬러지가 유입되더라도 약품처리에 의한 슬러지의 침강속도의 증가로 농축 및 방류수의 처리에 효과적인 것으로 판단되며, 충분한 체류시간 확보에 의한 수질개선이 가능할것으로 판단된다.



#### 참고문헌

1. 상수도 시설기준(2004) 한국상수도협회
2. 日本水道協會 (2000) 水道施設設計指針 · 解説.
3. Cho, S. H., Colin, F., Sardin, M., & Prost, C.(1993) Settling Velocity Model of Activated Sludge, *Water Research*, Vol. 27, 1237-1242.
4. Cornwell, D. A.(1999) Water Treatment plant Residuals Management, In *Water Quality and Treatment*, 5th ed, AWWA, McGraw-Hill, Inc..
5. Dick, R. I.(1972) *Thickening, Process Design in water Quality Engineering: New Concepts and Developments*, E. L. Thackston and W.W. Eckenfelder, Jr., Eds., Jenkins Publishing Co., Austin, Texas and New York.
6. Islam, M. A., Karamisheva, R. D.(1998) Initial Settling Rate/Concentration Relationship in Zone Settling, *J. Envir. Engrg.*, Vol.124, No. 1.
7. Metcalf & Eddy(1991) *Wastewater Engineering - Treatment, Disposal, Reuse*, 3rd. ed., Mcgraw-Hill.
8. Vesilind, P. A.(1974) *Treatment and Disposal of Wastewater Sludges*, Reviseded., Ann Arbor Science.
9. Yoshioka, N. Y., Hotta, S. T., and Tsumami, S.(1957) Continuous Thickening of Homogeneous Flocculated Slurries, *Chemical Engineering*, Tokyo, Japan, 21, 66-74.
10. Zhao, Y. Q.(2004) Settling behaviour of polymer flocculated water-treatment sludge I: analyses of settling curve, *Separation and Purification Technology*, 35.