◀解 說▶

沈澱法에 의한 廢水処理의 基本原理

趙 光 明*

Ⅰ. 序 言

廢水處理를 위하여 沈澱法을 적용시키는 目的은 廢水內에 존재하는 汚染物중에서 물보다 무거운 浮遊物(Suspended Solids, SS)을 重力에 의하여 갈아 앉히는 것이며 이를 實施하기 위하여 設置한 탱크를 沈澱池(Settling tank)라고 한다.

廢水處理시 沈澱은 다음의 目的을 達成하기 위하여 이용될 수 있다.

① 砂石(grit)을 除去하기 위하여,

② 一次沈澱池에서는 沈砂池(grit chamber)에서 除去되지 않은 작은 粒子狀의 浮遊物을 除去하기 위하여,

③ 活性슬러지工法이나 撒水濾床의 二次沈澱池에서는 生物學的으로 形成된 凝結物(floc)을 除去하기 위하여,

④ 化學的인 凝集法으로 廢水를 處理하는 경우에는 化學的으로 形成된 floc을 沈澱시키기 위하여,

⑤ 슬러지(Sludge) 濃縮槽에서는 浮遊物을 濃縮시키기 위하여,

大部分의 경우 沈澱池의 主目的은 깨끗한 處理水를 얻는 것이지만 또한 취급과 次後處理가 용이하도록 슬러지를 잘 농축시키는 것도 또한 중요하므로 沈澱池의 설계시에는 깨끗한 流出水(effluent)와 농축슬러지의 획득을 모두 고려해야 한다.

沈澱은 SS의 濃度와 粒子 相互간의 작용정도에 따라 Ⅰ형, Ⅱ형, 地域 및 壓縮沈澱의 네 종류로 區分되는데 이들 침전현상은 한 沈澱池에서 따로 일어날 수도 있으나 同時에 일어날 수도 있다.

廢水處理에서 沈澱의 重要性이 크므로 위에서 언급된 沈澱현상을 잘 이해하는 것은 매우 바람직하다고 생각된다.

Ⅱ. Ⅰ型沈澱(Type Ⅰ or Discrete Particle Settling)

그림 1에서 보는 바와같이 Ⅰ型沈澱은 凝結性이 낮은 粒子들이 낮은 濃度로 존재하는 廢水의 沈澱에서 일어나며 따라서 粒子들은 沈澱過程에서 獨立粒子로서 沈澱하며 他粒子와 凝結하지 않는다. Ⅰ型沈澱은 下水處理場의 沈砂池나 淨水場의 普通沈澱池에서 일어나는 침전현상으로 Newton과 Stokes에 의한 在來式 沈澱法則으로 分析될 수 있다. Newton의 法則에 의하면 水中에서 落下하는 粒子에 作用하는

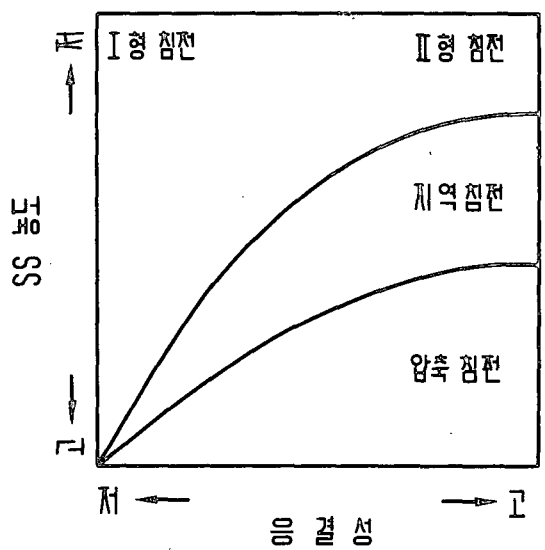

그림 1. 沈澱의 種類

* 正會員, 陸軍士官學校

重力과 물에 의한 마찰저항을 고려함으로써 沈澱粒子의 終速度(terminal velocity)를 구할 수 있다. 沈澱粒子에 作用하는 重力G는 다음式으로 表現된다.

$$G = (\rho_s - \rho)\, g V \quad \cdots\cdots (1)$$

式 (1)에서 ;

ρ_s = 粒子의 密度

ρ = 물의 密度

g = 重力加速度

V = 粒子의 부피

한편 마찰저항력은 式 (2) 로 표현된다.

$$R = \frac{C_D A \rho v^2}{2} \quad \cdots\cdots (2)$$

위의 式에서 ;

C_D = 마찰저항계수

A = 침전방향에 수직인 입자단면적

v = 침전속도

終速度는 重力과 마찰저항력이 같은 경우에 일어남으로 球形粒子인 경우 式(1) 과 式(2)로부터 Newton法則으로 불리우는 式(3)이 유도될 수 있다.

$$V_c = \left[\frac{4}{3} \frac{g(\rho_s - \rho)d}{C_D \rho} \right]^{1/2} \quad \cdots\cdots (3)$$

式(3) 에서 d는 球形粒子의 직경, V_c는 終速度를 뜻한다.

마찰저항계수 C_D는 粒子주위의 물의 흐름상태에 따라 변하므로 Reynolds 數의 함수가 되며, 球形粒子인 경우 式(4) 로 나타낼 수 있다.

$$C_D = \frac{24}{N_R} + \frac{3}{\sqrt{N_R}} + 0.34 \quad \cdots\cdots (4)$$

Reynolds 數가 대략 1이하인 層流상태에서는 式(4)에서 첫째項이 큰 값을 가지게 되며 이를 式(3)에 대입시키면 式(5)로 표현되는 Stokes 法則을 얻을 수 있다.

$$V_c = \frac{g(\rho_s - \rho)d^2}{18\mu} \quad \cdots\cdots (5)$$

따라서, I型沈澱이 지배하는 沈澱池의 설계에서는 終速度가 V_c인 粒子의 크기를 선정해서 終速度가 V_c와 같거나 큰 粒子는 모두 除去되도록 한다. 이런 경우 沈澱下水의 流量Q는 다음式으로 계산될 수 있다.

$$Q = A V_c \quad \cdots\cdots (6)$$

위의 式에서 A는 沈澱池의 水面積을 뜻하는데 式(6)을 변형시키면 $V_c = Q/A$가 되며 Q/A를 表面負荷率(overflow rate 或은 surface loading rate)라고 하며 粒子의 終速度와 같다는 것을 알 수 있다. 따라서 表面負荷率은 m^3/m^2-day 或은 m/day의 單位를 가지게 된다. 式(6)은 또한 沈澱池의 下水處理能力이 沈澱池의 깊이와는 관계없고 表面負荷率에 의해서 決定된다는 것을 나타낸다.

廢水가 연속적으로 흐르는 沈澱池에서는 設計流速 V_c를 가지는 粒子가 모두 沈澱池바닥에 沈澱할 수 있도록 沈澱池의 깊이와 滯留期間을 선정하여야 한다. 設計流速, 滯留期間 및 沈澱池의 水深간에는 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$V_c = \frac{\text{水深}}{\text{滯留期間}} \quad \cdots\cdots (7)$$

그러나 실제설계에 있어서는 流入口와 流出口의 渦流効果, 短回路, 슬러지저장, 슬러지除去機의 作動에 의한 速度傾斜 等을 고려하여야 한다.

理想的인 沈澱池에서의 I型沈澱은 그림 2에 圖解되어 있는데 沈澱速度가 V_c보다 낮은 粒子는 滯留期間동안에 一部만 除去된다. 여러가지 크기의 粒子들이 유입구측의 水深 全體에 걸쳐 골고루 分配되었다고 가정하는 경우 그림 2의 입자궤도를 분석함으로써 침전속도가 V_c보다 낮은 V_p를 가진 粒子가 除去되는 率 X_p는 式(8) 로 표현할 수 있다는 것을 알 수 있다.

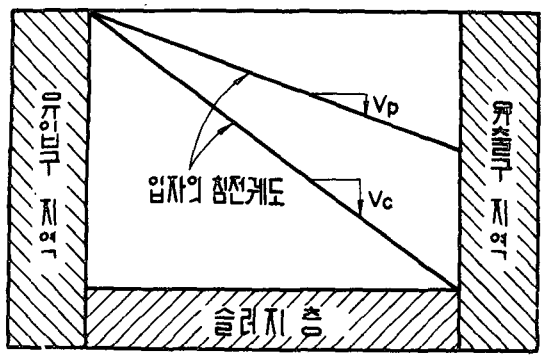

그림 2. 理想的인 沈澱池에서의 Ⅰ型沈澱

$$X_p = \frac{V_p}{V_c} \quad \cdots\cdots (8)$$

따라서 下水內에 여러가지 크기의 粒子가 存在하는 경우 粒子의 沈澱速度와 除去率간에는 그림 3과 같은 관계가 주어 지며 그림 3으로부터 全體除去率이 式(9)로 表現될 수 있다는 것을 알게 된다.

$$\text{除去分率} = (1 - X_c) + \int_0^{X_c} \frac{V_p}{V_c} dx \quad \cdots\cdots (9)$$

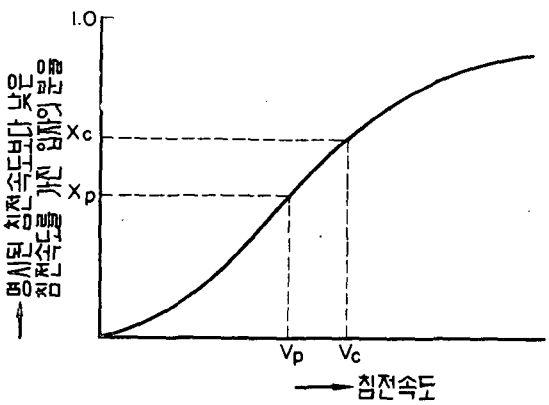

그림 3. 獨立粒子(discrete particles)의 沈澱速度 解析曲線

Ⅲ. Ⅱ型沈澱(Type Ⅱ or Flocculant Settling)

비교적 낮은 농도로 존재하는 粒子들은 沈澱도중 때로는 獨立粒子로 沈澱하지 않고 접촉시 凝結하는 경우가 있으며 이런 경우에는 粒子의 크기 및 무게가 증가하므로 결국 沈澱速度가 빨라지게 된다. 이런 침전을 Ⅱ型沈澱이라고 하는데 이때 凝結程度는 表面負荷率, 沈澱池의 깊이, 速度傾斜, 粒子의 濃度, 粒子徑의 分布 等에 의하여 決定되는 粒子간의 접촉기회에 의하여 좌우되며 이들 變數들의 效果는 沈澱實驗에 의해서 측정될 수 있다.

凝結性粒子의 沈澱特性을 測定하기 위해서는 沈澱管을 使用할 수 있는데 이때 沈澱管의 內徑은 어떤 것을 使用해도 무방하나 깊이는 실제 침전지의 깊이와 같아야 한다. 통상 內徑이 150 mm이고 깊이가 3 m정도인 프라스틱관을 사용하면 충분하다. 試料採取口는 그림 4에 도해된 바와같이 0.6 m 간격으로 설치해야 하며, 浮遊物을 함유하는 試液을 沈澱管에 채울 때는 最初에 粒子가 全體깊이에 골고루 퍼지도록 有意해야 한다.

實驗도중 對流에 의한 誤差가 생기지 않도록 溫度를 一定하게 유지해야 하며 침전이 동요되지 않는 상태에서 일어나도록 해야 한다. 一定한 시간간격을 두고 試料採取口에서 試料를 採取한 다음 浮遊物濃度를 測定한다. 그다음 그림 4에 주어진 바와같이 시간, 수심 그리고 부유물제거효율간의 관계를 곡선으로 그린다. 그림 4에서와 같이 체류기간이 t_2이고 수심이 h_5인 경우 전체제거효율은 다음式으로 계산하면 된다.

$$\text{總除去效率} = \frac{\Delta h_1}{h_5} \times \frac{R_1 + R_2}{2} + \frac{\Delta h_2}{h_5} \times \frac{R_2 + R_3}{2}$$

$$+ \frac{\Delta h_3}{h_5} \times \frac{R_3 + R_4}{2} + \frac{\Delta h_4}{h_5} \times \frac{R_4 + R_5}{2} \quad \cdots\cdots (10)$$

現場에서의 條件은 실험실에 비하여 좋지 않기 때문에 沈澱管實驗에서 얻은 表面負荷率에다 0.65 ~ 0.85를 곱하여 設計 表面負荷率로 채택하여 滯留期間은 1.25 ~ 1.5배를 하여 채택하는 것이 좋다.

Ⅱ型沈澱은 下水處理場의 一次沈澱池, 二次沈

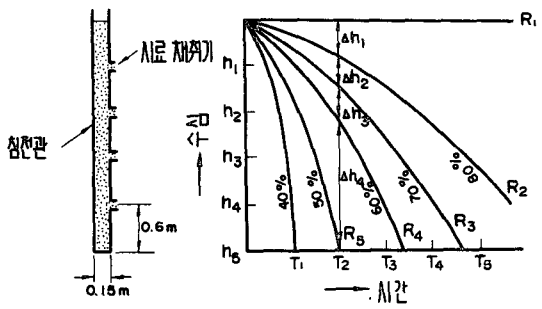

그림 4. 凝結性 粒子를 위한 沈澱管 및 沈澱曲線

澱池의 上部, 그리고 化交的으로 形成된 floc의 沈澱에서 일어난다.

Ⅳ. 地域沈澱(Zone or Hindered Settling)

生物學的으로 廢水를 處理하는 경우의 二次沈澱池에서 發生하는 침전현상으로, 廢水의 浮遊物濃度가 어느정도 높으면 粒子간에 작용하는 힘이 커서 주위의 粒子가 自由롭게 침전하는 것을 방해하기 때문에 일어나며, 粒子는 相互 고정된 위치를 견지하면서 하나의 덩어리로서 침전하게 된다.

廢水의 浮遊物濃度가 높으면 그림 5에 설명된 바와같이 한 침전지내에서 水深에 따라 Ⅰ型, Ⅱ型, 地域 그리고 壓縮침전이 모두 일어날 수 있다. 이런 경우 浮遊物의 濃度가 높기 때문에 물은 凝結된 固形物간의 간격을 통해서 위로 이동하게 되며 그결과 粒子들은 서로 일정한 위치를 유지하여 膜(blanket)을 형성한 채로 침전하게 되는데 이를 地域沈澱이라 하며,그에 따라 地域沈澱區域 위에는 비교적 깨끗한 水層이 形成된다. 地域沈澱區域에서의 沈澱率은 固形物의 濃度와 그들의 特性에 의하여 좌우된다.

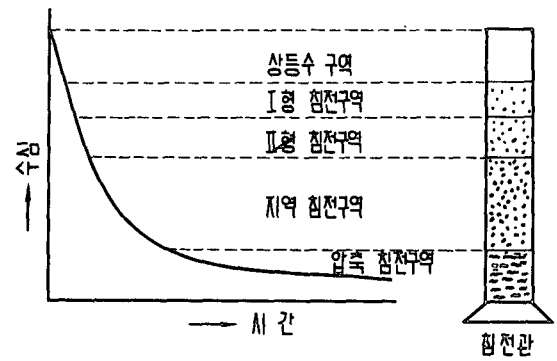

그림 5. 活性슬러지의 沈澱區域 說明圖

沈澱이 계속됨에 따라 침전관의 바닥에는 압축된 粒子層이 생기게 되는데 이를 壓縮沈澱區域이라 한다. 이 區域의 粒子들은 서로 物理的으로 접촉하는 구조물을 형성하며 壓縮沈澱이 지속됨에 따라 그상부에는 浮遊物의 농도가 낮은 층이 형성된다. 따라서 地域沈澱區域에서의 浮遊物濃度는 一定하지 않고 위에서 밑으로 갈수록 그농도가 점차로 증가하게 된다.

다른 침전현상과 마찬가지로 지역 및 압축침전이 중요시 되는 경우에도 침전특성을 알기 위해서는 침전관실험을 실시해야 한다. 沈澱管實驗에서 얻은 資料에 근거해서 두가지의 다른 설계방법이 채택될 수 있는데, 첫째 방법은 한개의 침전관을 사용하여 얻은 자료를 이용하는 것이며, Solids flux 法이라고 알려져 있는, 두번째 방법에서는 부유물의 농도를 각각 다르게 하여 실시한 실험결과를 이용하는 것이다.

Ⅳ－1. 單團實驗(single - batch test)의 결과에 근거하여 침전지의 水面積을 계산하는 方法

設計目的上 表面負荷率은 다음에 열거된 要素들을 고려한 다음 선택되어야 한다 ;

① 淨化(Clarification)에 요구되는 水面積
② 濃縮에 요구되는 水面積
③ 沈澱池로부터의 슬러지除去率

앞에서 설명된 바와같이 沈澱管實驗을 實施함으로써 自由沈澱을 위하여 요구되는 水面積은 바로 구할 수 있다. 그러나 濃縮을 위하여 요구되는 水面積은 自由沈澱을 위하여 요구되는 水面積보다 통상 크기 때문에 문제가 달라진다. 이런 경우에는 다음과 같은 방법을 택하면 된다.

먼저 높이가 H_0인 침전관에다 부유물의 농도

가 균일하게 C_0인 試液으로 채운다. 그림 6에 도해된 바와같이 시간이 지남에 따라 부유물이 침전하면서 형성되는 접촉면(interface)의 위치를 그래프에 표시하면 접촉면의 침하라는 율은 주어진 시간의 곡선의 기울기가 된다. 그러면 농축을 위하여 요구되는 水面積A는 다음 式으로 계산할 수 있다.

$$A = \frac{Q t_u}{H_0} \quad \cdots\cdots (11)$$

위의 식에서 Q는 廢水의 流量, t_u는 침전지에서 제거되는 슬러지의 부유물농도에 도달하는 시간을 뜻한다.

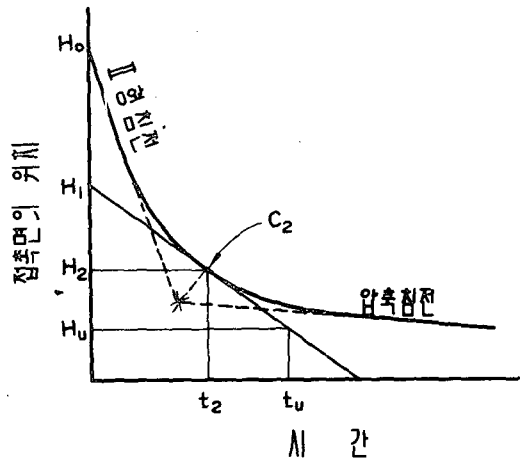

그림 6. 접촉면 침전곡선의 圖解法

침전지의 슬러지취급능력을 통제하는 監界濃度(critical concentration)는 농도가 C_2인 H_2의 높이에서 일어난다. 이점은 II型沈澱區域과 壓縮沈澱區域을 나타내는 곡선에 접선을 그어 만나는 점에서 형성되는 내각을 二等分하는 선이 곡선과 만나는 점이 된다. 그리고 시간 t_u는 다음과 같이 결정한다;

① 제거되는 슬러지의 요구되는 농도 C_u가 일어나는 수심 H_u에서 수평선을 긋는다. H_u는 다음의 式에 의하여 결정된다.

$$H_u = \frac{C_0 H_0}{C_u} \quad \cdots\cdots (12)$$

② C_2라고 지시된 점에서 沈澱曲線에 接線을 그린다.

③ 위의 2단계에서 그어진 두개의 선이 만나는 점에서 時間軸에 수선을 그으면 만나는 점이 t_u이다.

위에서 구한 t_u를 式(11)에 代入시키면 濃縮을 위하여 요구되는 沈澱池의 水面積을 구할 수 있다. 그다음 廢水의 淨化(clarification)를 위하여 요구되는 水面積을 구하여 두값중에서 큰값을 선택하여야 한다.

IV－2. Solids flux法에 의하여 沈澱池의 水面積을 구하는 方法

安靜狀態에서 作動중인 沈澱池에서는 그림 7에 주어진 바와같이 일정한 양(flux)의 固形

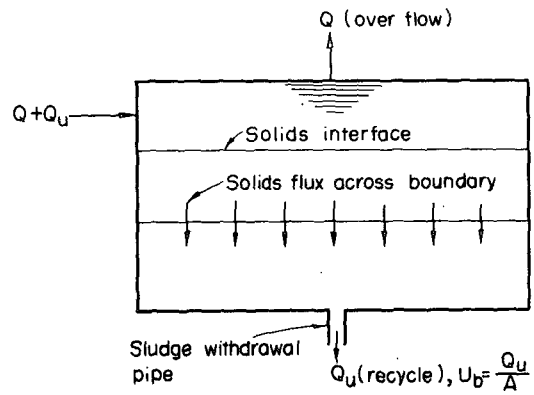

그림 7. Solids flux法에 의한 沈澱池의 設計를 위한 설명도

物이 下向으로 이동하게 되는데 이 下向移動은 重力沈澱과 슬러지除去에 그 원인이 있다. 重力에 의한 地域沈澱에서 고형물의 이동량(solids flux)은 式(13)과 같다.

$$G_g = C_i V_i \quad \cdots\cdots (13)$$

위의 式에서 G_g는 重力에 의한 solids flux, C_i는 고려되는 點에서의 SS 濃度, 그리고 V_i는 C_i 濃度에서의 SS의 沈澱速度를 뜻한다.

한편, 沈澱池바닥에서의 슬러지除去에 의한 solids flux G_u는 다음式으로 계산된다.

$$G_u = C_i U_b = C_i \frac{Q_u}{A} \quad \cdots\cdots (14)$$

위의 式에서 Q_u는 슬러지除去率, A는 沈澱池의 斷面積, 그리고 U_b는 슬러지除去에 의한 폐수의 下向速度를 뜻한다.

따라서, 全體 solids flux G_t는 式(13)과 式(14)를 合한 값이 된다.

$$G_t = (C_i V_i + C_i U_b) \quad \cdots\cdots (15)$$

式(15)에서 重力地域沈澱에 의한 solids flux는 고형물의 농도와 그농도에서의 고형물의 特性에 의하여 결정되며, 沈澱管實驗資料에 의하여 solids flux 曲線을 구하는 절차가 그림 8에 설명되어 있다. 약 1,000 mg/ℓ 이하의 낮은 농도에서는 고형물의 침전속도가 농도와는 별로 무관하므로 침전에 의한 solids flux는 적다. 고형물의 농도가 증가하는데도 침전속도가 거의 동일한 값에 머무른다면 重力에 의한 total flux는 고형물농도가 증가함에 따라 증가하기 시작한다. 대단히 높은 농도에서는 지역침전속도가 0에 접근하며 그결과 중력에 의한 solids flux도 대단히 적게 된다. 따라서 중력에 의한 solids flux는 고형물의 농도가 증가함에 따라 그림 8의 (C)에 보인 바와같이 하나의 최대점을 지나간다고 결론지을 수 있다.

沈澱池바닥에서의 슬러지除去에 의한 solids flux는 그림 9에 주어진 바와같이 슬러지除去에 기인한 廢水의 下向流速 U_b에 비례하게 되며 그결과 전체 solids flux는 重力에 의한 solids flux와 슬러지除去에 의한 solids flux의 合이 된다. 슬러지除去를 위한 流量을

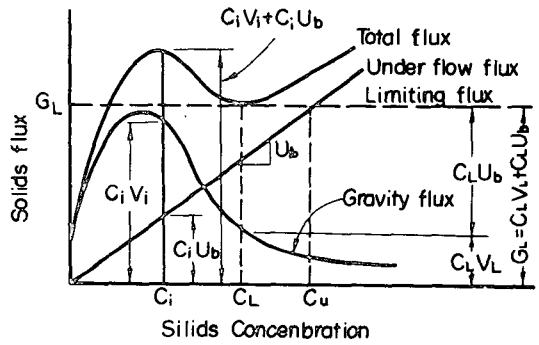

그림 9. Solids Flux法에 의한 침전자료의 분석

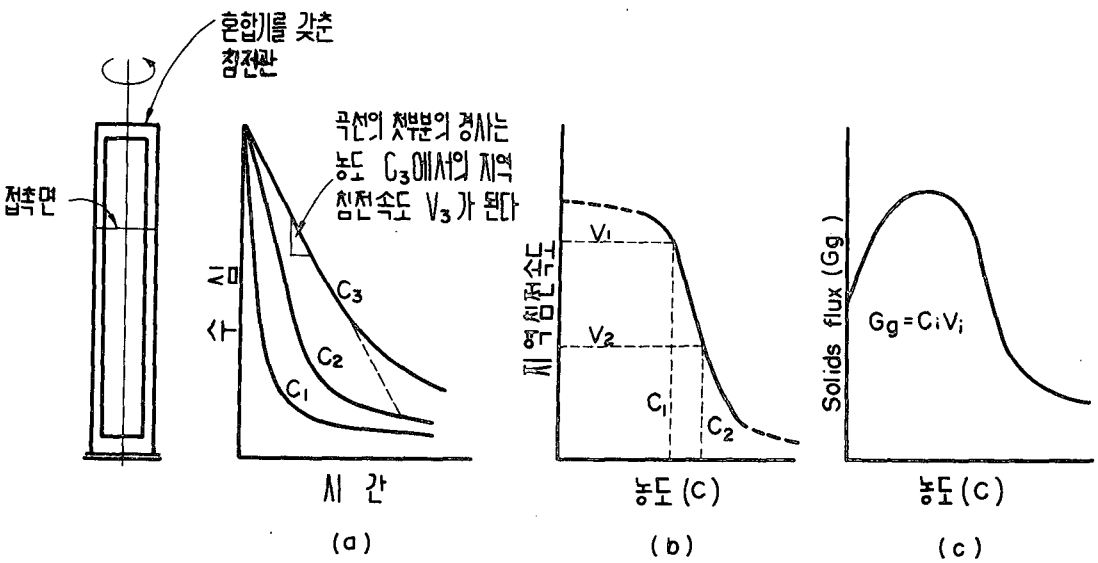

그림 8. 重力에 의한 solids flux와 고형물농도간의 관계

증가시키거나 감소시키면 그림 9에서 total flux 곡선을 상향 또는 하향으로 이동시킬 수가 있다. 따라서 우리는 沈澱池에서의 슬러지除去를 위한 流量의 조절이 하나의 통제방법이 된다는 것을 알 수 있다.

요구되는 濃縮槽의 斷面積은 다음과 같은 절차에 의하여 결정될 수 있다. 그림 9에 보인 바와같이 total flux 곡선의 가장 낮은 점에서 접선을 그리면 solids flux 軸과 만나는 點이 沈澱池가 감당해 낼 수 있는 solids flux G_L 가 되며 이를 limiting solids flux라고 한다. 한편 同一 水平線과 underflow flux 곡선과의 교차점에서 수선을 그어 고형물농도축과 만나는 점이 그때의 슬러지농도 C_u가 된다. 이는 沈澱池의 바닥부근에서는 重力에 의한 solids flux가 무시할 정도로 적고 고형물은 주로 슬러지除去 流量에 의하여 제거되기 때문에 가능한다. 沈澱池바닥 부근에서 重力에 의한 solids flux가 무시될 정도로 적다는 것은 limiting solids flux가 발생하는 水深 이하의 침전지부분에 대하여 物質平衡을 취하고 슬러지의 중력침전속도를 슬러지除去管內에서의 流速과 비교해 봄으로써 증명할 수 있다. 만약 침전지로 유입하는 고형물의 양이 그림 9에서 정의된 limiting solids flux보다 많으면 고형물은 침전지에 축적되고 침전지의 슬러지저장능력이 불충분한 경우 침전지의 상부에서 유출수와 함께 흘러나가게 된다. 앞에서 구한 limiting solids flux 값을 이용하여 요구되는 침전지의 단면적 A를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$A=\frac{(Q+Q_u)C_0}{G_L}=\frac{(1+\alpha)QC_0}{G_L} \quad \cdots\cdots (16)$$

式(16)에서 Q는 沈澱池流入水의 流量, Q_u는 침전지 바닥에서의 슬러지除去를 위한 流量, C_0는 流入水의 SS 농도, 그리고 $\alpha=Q_u/Q$이다.

그림 9에서 보는 바와같이 침전지바닥에서 제거되는 슬러지의 SS농도를 증가시킬려면 underflow flux 線의 기울기를 줄여야 하고 그러자면 limiting solids flux가 감소되면서 결국 침전지의 단면적이 커져야 한다. 실제 설계시에는 슬러지除去流量값을 여러개로 바꾸면서 계산해야 하는데 生物學的 슬러지인 경우 대략 $7.1\times10^{-5}\sim1.4\times10^{-4}$ m/sec의 값이 알맞다.

V. 壓縮沈澱(Compression Settling)

二次沈澱池의 바닥이나 슬러지濃縮槽에서는 밑의 고형물이 위의 고형물의 무게에 의하여 눌림으로써 부피의 감소가 일어나는데 이를 壓縮沈澱이라 하며 壓縮沈澱區域에서의 슬러지부피도 沈澱實驗에 의하여 구할 수 있다. 壓縮沈澱區域에서의 슬러지壓縮率은 시간 t에서의 깊이 H_t와 長時間에 걸쳐 슬러지가 沈澱하는 깊이 H_∞에 비례한다는 것이 알려져 있다.

$$H_t-H_\infty=(H_2-H_\infty)e^{-i(t-t_2)} \quad \cdots\cdots (17)$$

式(17)에서 H_2는 시간 t_2에서의 슬러지의 높이이며 i는 상수이다.

압축침전시 슬러지를 휘저어주면 floc이 파괴되면서 물이 빠져 나가므로 슬러지가 더잘 농축된다. 따라서 沈澱實驗을 실시할 때 알맞게 휘저어 주어야만 더 정확한 결과를 얻을 수 있게 된다.

VI. 結 言

大部分의 廢水는 程度의 差異는 있지만 浮遊物을 함유하며 浮遊物의 除去를 위하여 가장 많이 채택되는 경제적인 廢水處理法은 沈澱일 것이다.

따라서 沈澱池의 設計와 運營을 위하여 沈澱의 基本原理를 理解함은 매우 중요하며, 特히 生物學的인 方法으로 廢水를 處理하는 경우 二次沈澱池에서는 주로 地域沈澱이 일어나며 그의 解析이 어려우므로 여기서는 地域沈澱에 중점을 두고서 설명이 주어졌다.

본 글이 폐수처리시설의 설계업무에 종사하는 기술자들에게 다소나마 도움이 되었으면 하는 마음으로 글을 맺는다.