

고농도 폐수처리를 위한 스크류 데칸트 기술



나 은 수

(KIMM 환경설비연구부)

- '76 - '80 해군사관학교 기계공학과(학사)
- '92 - '94 창원대학교 기계공학과(석사)
- '91 - 현재 한국기계연구원 선임기술원



김 재 형

(KIMM 환경설비연구부)

- '89 - '93 한국과학기술원 과학기술대학 기계공학과(학사)
- '93 - '95 포항공과대학 기계공학과(석사)
- '95 - 현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 언

원심분리기는 고액분리, 액액분리, 기체분리등 매우 다양하게 분리공정에 활용되고 있으며 표 1과 같이 원심침강기와 원심필터기로 구분되며 각 형식별 수집중에 이른다.

스크류 데칸트는 원심침강기에 해당되며 이것은 바울과 스크류의 고속회전에 의하여 최적분리 "G" force가 발생하고 원심가속으로 피분리물의 고형분이 바울벽에 침적되며 스크류 컨베이어의 회전차속과 꺾기에 의해서 케익은 밀려나 오게 된다.

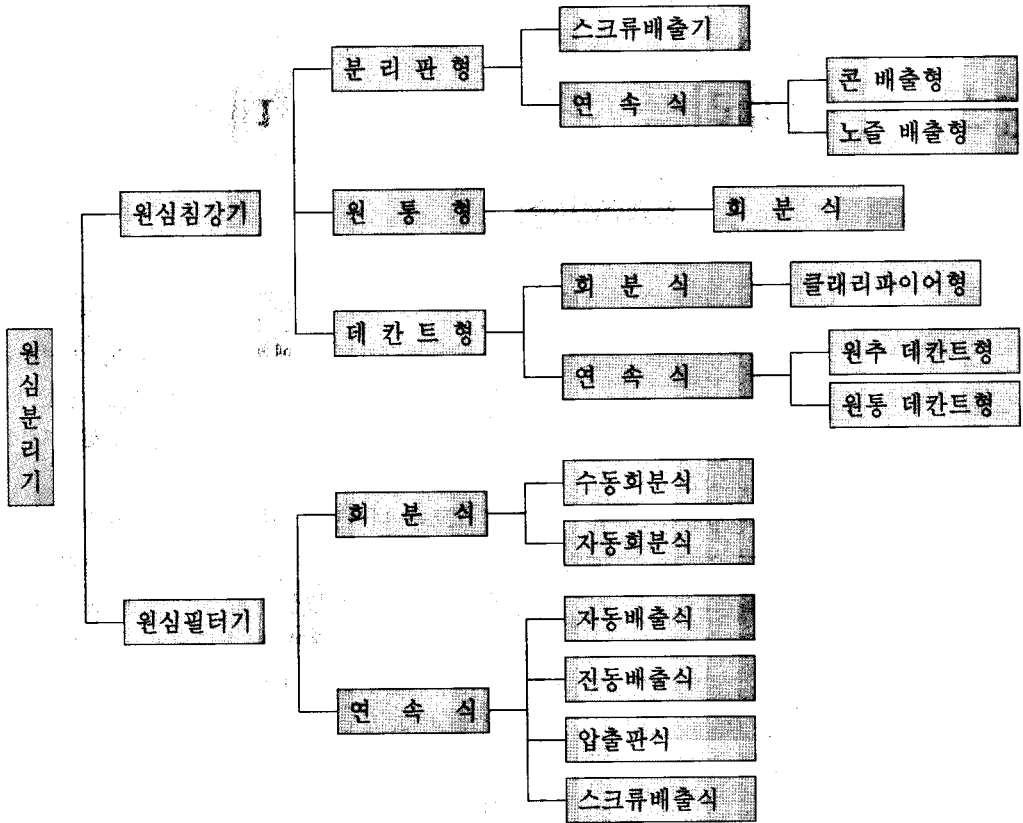
환경, 식품, 화공, 건설 등 거의 전 사업분야에서 고액, 액액분리에 활용되어지고 있는 스크류 데칸트는 일본, 독일, 스웨덴 등의 일부 기술선진국에 의하여 세계 시장이 독점되어 왔다.

최근에 이르러 중국, 헝가리, 러시아, 미국, 네덜란드 등의 국가가 급속한 기술적 진보를 이루어 세계시장을 노크하고 있으나 상당한 기간 동안은 현체제가 계속되어질 것으로 본다.

스크류데칸트는 다양한 물성을 가진 고체와 액체, 액체와 액체를 분리해야 하는 까다로운 기술적 특성과 500~2000kg이 되는 몸체가 1000~6000rpm 정도로 고속회전하게 되므로 윤활기술, 가공기술, 재료기술 등이 뒷받침되어야 하고 오랫동안 실험한 데이터와 기계, 물성에 다양한 경험이 있을 때 고부가가치 스크류데칸트를 상품화 할 수 있다.

적용물성에 따라 다양한 기계적 특성과 종류를 보이지만 여기에서는 고농도 유기성 폐수의 대표격인 인분뇨, 축산폐수 슬러지 분리에 사용

표 1. 원심분리의 분류



되는 스크류데칸트의 기술적, 기술외적 사항을 다루기로 한다.

스크류 데칸트는 두가지 또는 세가지의 물성이 분리될 수 있는 최적의 분리조건이 되지 않으면 오히려 재현탁하여 배출하게 되므로 어느 정도 잘 분리되는냐의 문제가 아니라 분리되는

냐, 안되는냐의 문제로 직결된다.

실지 예로 일본의 분뇨처리장에서 사용하는 스크류데칸트와 운전조건으로 우리나라 분뇨처리장에 설치 운전하게 되었을 때 물성차이로 인하여 전혀 분리되지 않았으며 우리나라 내에서도 행정구역에 따라 배출되어지는 물성이 다르

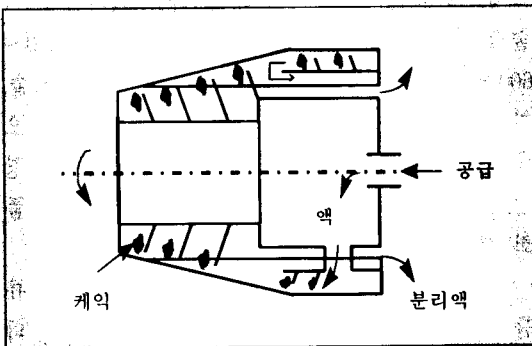


그림 1. S형 스크류 데칸트

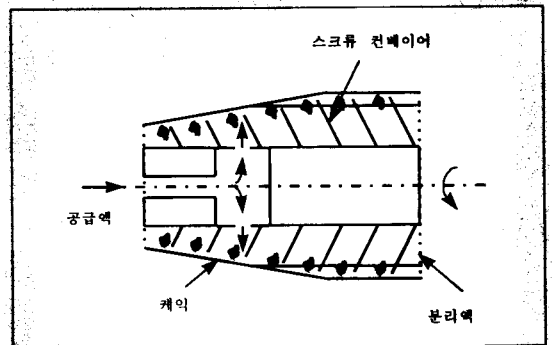


그림 2. VS형 스크류 데칸트

므로 현장에서 setting 하는 기술이 매우 중요하다고 볼 수 있다.

축산폐수, 인분뇨의 슬러지 제거에 가장 효율적이라고 할 수 있는 원심분리기는 원심침강식이며 또한 가장 널리 활용되고 있는 것은 그림 3과 같은 원통데칸트형의 SVS식 스크류 데칸트이다.

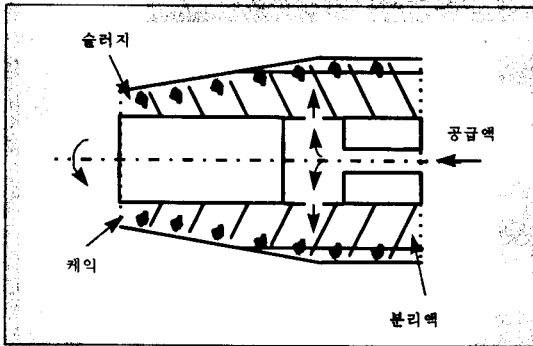


그림 3. SVS형 스크류 데칸트

인분뇨의 경우 1971년 서울 중랑구 위생처리 사업소에 설치한 이후 전처리와 오니처리부분에서는 상당히 널리 사용되고 있으나 축산폐수의 경우 1995년 이천시 축산폐수공동처리장을 시작으로 이제 겨우 20여개소에 공급되어 있는 실정이다. 이것은 스크류 데칸트 자체의 처리능력이크고 대당 평균 2~3억원 정도의 고가이므로 현재 돼지 1000두 이하가 전체 양돈사업장의 98%에 해당되는 우리나라 축산업의 규모개선과 관계된다고 볼 수 있고 앞으로도 선진국과 마찬가지로 축산폐수의 공동처리, 축산업의 대규모화, 각종 폐수의 집합처리 추세로 인하여 수요는 계속 증가될 것으로 볼 수 있다.

2. 기술적 특성

비교적 난이도가 적은 환경분야에 운용되고 있는 스크류 데칸트의 생산업체는 (주)로알정공, 원진기계, 신원그린, 과학유니온 카바이드, 동진기계, 달성정밀이며 이중 (주)로알정공을 제외한

대부분은 스크류 데칸트 전업 종업원 10명 내외 정도의 영세한 수준으로 스크류산 보정, 배어링 교체 등의 수리업무 비중이 큰 경우가 많다.

스크류 데칸트의 몸체에 해당하는 바울, 스크류 컨베이어는 가장 핵심기술이며 아직까지 우리나라에서는 독자설계 능력이 없다고 볼 수 있다. 환경분야에 운용되는 스크류데칸트의 국내공급에서 오니용은 독일 홈블트, 전처리용은 일본의 이시가와, 도모에, 다나베 등에서 모방제작하였으며 그 역사도 일천하고 현재 50~60% 정도 독자설계능력을 추정할 수 있으나 산, 학, 연의 체계적인 연구개발 실적이 전무하고 제작능력은 선진국의 90~95% 수준까지 볼 수 있다.

인분뇨는 식생활 습관에 따라 물성차이가 나게 되는데 이것은 지역별, 계절별로 다르게 나타나며 특히 생분해성인 관계로 SS의 변화가 심하고 객관적인 물성치를 제시하기 어렵다.

또한 축산폐수의 물성은 사료에 대해서도 차이가 나지만 돈사가 수세식인가 스크래퍼식인가에서도 차이가 나고 더욱이 저장조에 얼마나 두었는가, 온도는 얼마인가에 따라 스크류데칸트의 처리효율은 매우 달라지게 된다.

수세식에서 금방 처리할 경우 응집제를 사용하지 않아도 SS 제거율이 90% 이상 되지만 더운 여름 저장조에 몇일 체류한 돈분의 경우는 SS제거율이 50~60% 정도밖에 되지 않는다. 그러므로 우리나라처럼 기후 변화가 심하고 폐수의 성상이 불규칙할 경우에는 응집제를 선택적으로 사용할 수 있게 하되 그 피해를 최소로 하기 위해 원심탈수기의 압착단에만 살포하여 분리된 고형분의 cake화에만 이용하게 하여 폐수처리에 드는 비용을 감소시키고 화학약품에 의한 2차적 피해를 최소화 시켜야 된다고 본다.

인분뇨와 축산폐수는 분명한 환경위해 요인이지만 전후 처리에서 고농도 유기성 슬러지를 제거하여 퇴비화 하였을 때는 양질의 유기질 비료로 토양환경회복제로 활용되고 kg당 100원을 호가하는 고수의 생산재로 바뀌어지며 또한 자연

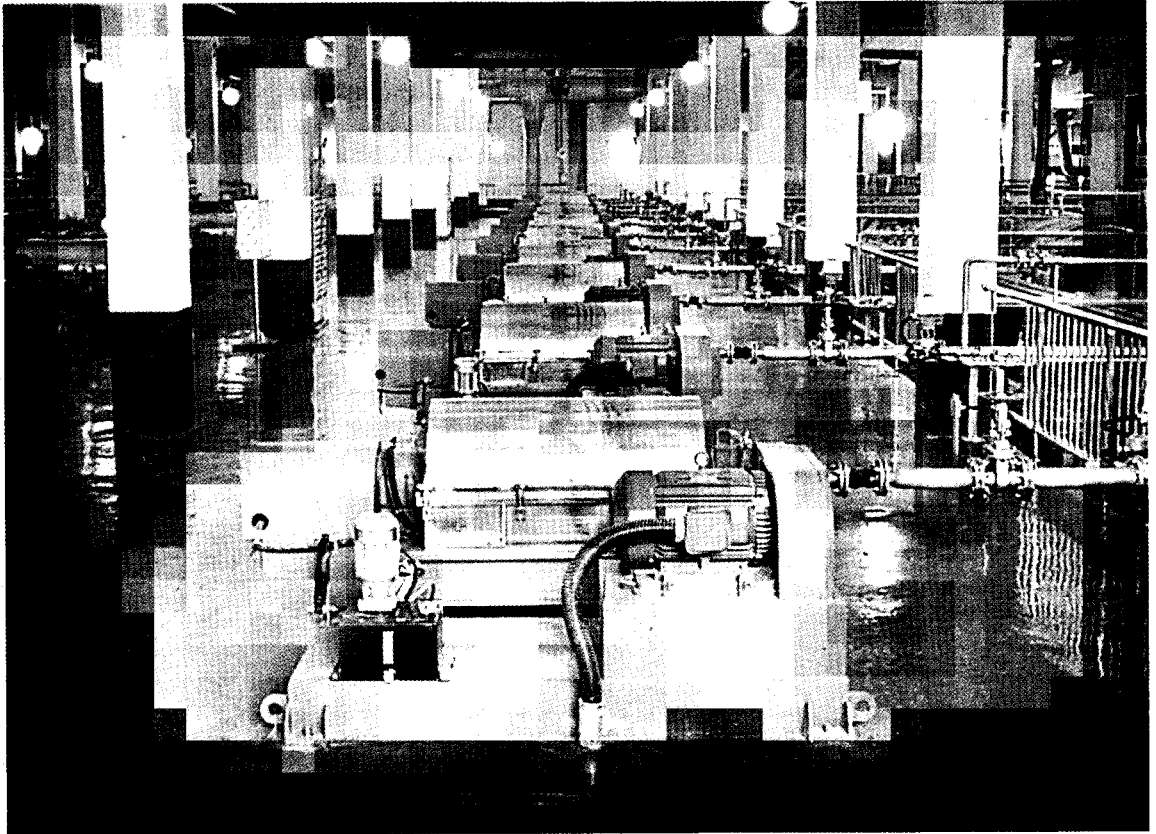


그림 4. 스크류 데칸트 설치도[대구광역시 서부하수처리장 처리능력 1200톤/일·22대, (주)로얄정공제작]

에서 온 것을 자연으로 회귀시키는 순환의 원리에도 합당하다고 볼 수 있다.

매년 환경분야 스크류데칸트 수요가 300억원 이상 되는 것을 감안하면 충분히 R&D 투자가 이루어져야 되며 인분뇨, 축산폐수 때문에 위험수위에 있는 수계오염 문제해결에도 참신한 기여가 될 것으로 판단되고 거의 전량 외국기술에 의존하고 있는 식품, 화공분야의 스크류 데칸트 기술개발도 항차적으로 해결해야 될 문제로 남아 있다.

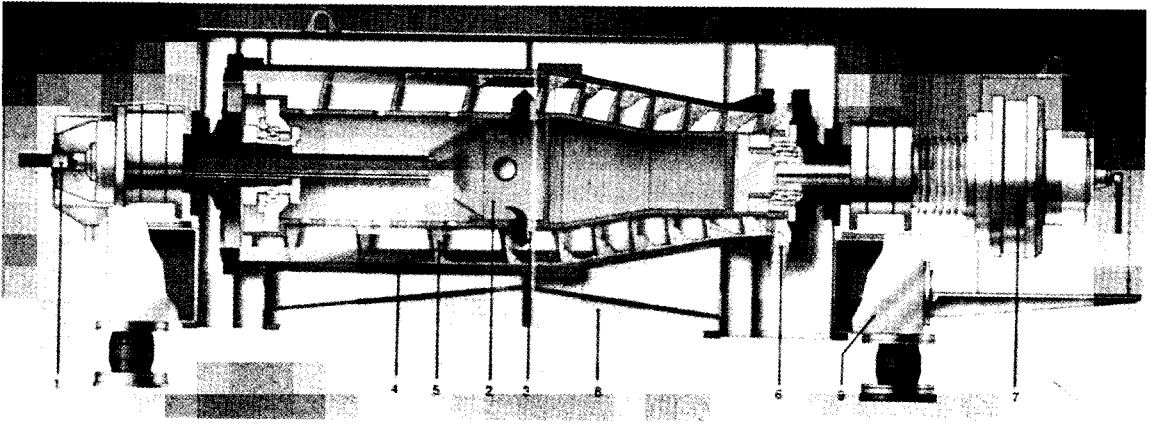
3. 작동원리

원심력을 이용하는 고액분리기인 데칸트는 9개의 세부장치로 구성되어 있으며 인분뇨, 축분뇨 처리시에는 대략 1,500 - 2,500G 범위에서 작동

되어지고 원심가속도를 발생시키기 위해서 바울과 스크류컨베이어의 직경에 따라 차이는 있지만 15,00-3,000rpm 정도 회전하고 회전체중량은 500-2,000kg 정도 된다.

중공으로된 스크류컨베이어(2) 내부에 주입파이프(1)를 통하여 고액혼합물을 공급하면 원액토출부(3)에서 분출되어 고상은 바울(4) 내벽에 침적되고 액상은 바울 대단부 좌측에 위치한 분리액 배출구를 통하여 배출된다.

바울내벽에 침적된 슬러지는 바울경사단에서 탈수되어진후 토출구부싱(6)으로 케이크 배출되어진다. 바울과 스크류컨베이어는 같은방향으로 회전하면서 스크류컨베이어가 바울의 회전속도보다 2-20rpm 정도 적게 회전하며 이러한 회전차로 인하여 케이크이송과 배출이 가능하게 된다. 차속을 발생시키기 위해서는 사이클론 감속기나



- | | | |
|------------------|-------------------|----------------|
| 1. 주입구 PIPE | 2. 주입 분리부 | 3. 원액 토출부 |
| 4. BOWL | 5. SCREW CONVEYOR | 6. 토출구 bushing |
| 7. 감속기(GEAR BOX) | 8. COVER | 9. BASE FLAME |

그림 5. 스크류 데칸트의 구조

유성기어감속기(7)를 사용하며 증량체의 고속회전에 따른 안전사고 방지를 위한 견고한 카바(8)이 있다. 이 외에도 윤활장치, 방진장치 등이 결합되어 있다.

4. 설계기법

4.1 침전현상 및 분리물성영향인자

스크류데칸트를 설계할 때 중요한 변수중의 하나는 원심력이 작용할 때의 침전속도이다. 피분리물이 원심력이 작용할 때와 작용하지 않고 중력에서 침전할 때의 차이점은 침전중인 입자에 작용하는 가속도가 중력가속도 인가 원심가속도 인가에 있다. 실제로 설계할 때 요구되는 침전속도는 입자가 원심력이 작용하는 동안 가지게 되는 값인데 이를 계산하기 위해서는 입자의 크기, 혼합액의 밀도, 점도, 비중 등 많은 데이터를 필요로 한다. 이러한 혼합물의 물성이 매우 복잡적이므로 데이터를 올바르게 측정하는 것도 어려울 뿐만 아니라 그 값도 신뢰하기 어렵기 때문에 모델데칸트의 유입수, 유출수, 케익의 상태, 즉 BOD, COD, TS, TKN, TP, 함수율을

측정하면서 특히 SS제거율에 초점을 두고 원심력장에서의 침전속도를 보정한다.

비압축성 액체에서 원심력에 의해 침전하고 있는 구형의 입자가 만족하는 운동방정식은 다음과 같다.

$$(F_E - F_D - F_B) = m \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

여기서 F_E 는 외부에서 입자에 작용하는 힘이고, F_D 는 유체의 흐름방향으로 마찰에 의해 생기는 항력이고, F_B 는 부력이다. 그리고 m 은 입자의 질량이고 V 는 입자의 속도이다.

외력 F_E , 항력 F_D , 부력 F_B 는 다음과 같다.

$$F_E = m a_E$$

$$F_D = C_D A \rho_p \frac{v^2}{2}$$

$$F_B = \left(\frac{m}{\rho_p}\right) \rho_m a_E \quad (2)$$

여기서 a_E 는 외력에 의해 입자의 가속도이고 C_D 는 항력계수이며, ρ_p 와 ρ_m 은 각각 입자와 유체의 밀도이다.

항력계수는 유체의 레이놀드수에 따라 다음과 같이 다르게 나타난다.

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad Re < 0.4 (\text{Stokes region})$$

$$C_D = \left(\frac{10}{Re}\right)^{1/2} \quad 0.4 < Re < 500 (\text{Allen region})$$

$$C_D = 0.44 \quad 500 < Re < 2 \times 10^5 (\text{Newton region}) \quad (3)$$

여기서 $Re (= D_p \rho_p V / \mu)$ 는 레이놀드수이다. 만약 입자에 작용하는 외력이 중력이라면 a_E 는 중력가속도 g 가 되고, 외력이 원심가속력이라면 a_E 는 $\omega^2 r$ 이 된다. 정상상태에서는 $\frac{dV}{dt} = 0$ 의 조건이 만족되므로 이를 이용해서 침전속도를 구하면 다음과 같이 중력장에서의 침전속도 V_g 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$V_c = ZV_g \quad Re < 0.4$$

$$V_c = Z^{1/3} V_g \quad 0.4 < Re < 500$$

$$V_c = Z^{1/2} V_g \quad 500 < Re < 2 \times 10^5 \quad (4)$$

여기서 $Z (= \omega^2 r / g)$ 는 원심효과이고 V_c 는 원심력하에서의 침전속도이다.

4.2 물성분리의 영향인자

스크류 데칸트의 액상, 고상 분리에 영향을 주는 요소는 다음과 같다.

- (1) 공급 방법(공급 탱크 위치, 가압정도)
- (2) 공급량, 공급 속도, 공급 시간(kg/h, m³/h)
- (3) 공급 고형물 농도(Wt%, Vol%)
- (4) 고형물 평균 입경 또는 입도 분포(mm, μ , mesh)
- (5) 고형물 형상 또는 결정형
- (6) 고형물 비중(g/cc, kg/m³)
- (7) 분리 고형물의 함수율
- (8) 공급 온도(°C)
- (9) 분리 온도(°C)
- (10) 분리 전후의 고형물 입경 변화의 정도

(11) 혼합물의 비중(g/cc, kg/m³)

(12) 혼합물의 점도(cp)

(13) 혼합물의 표면장력(kg/S²)

(14) 액의 휘발성, 발화성, 발포성

4.3 바울과 스크류 컨베이어

스크류 데칸트 내의 침전지는 다음과 같이 두 평행판 사이에 있는 피분리물로 모델링이 가능하다.

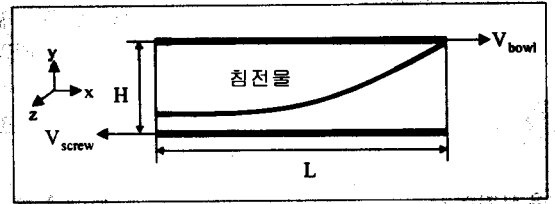


그림 6. 침전연못의 모델링

원심력은 y방향으로 작용하고 두 평행판 사이의 피분리물이 통과하는 수로가 된다. 평행판 사이의 y방향 높이 H는 스크류 데칸트의 스크류 피치와 바울이 만드는 공간에서 피분리물이 점유하고 있는 액체의 높이이다. 평행판의 x방향으로의 길이 L은 피분리물이 점유된 스크류 피치와 바울이 만드는 공간의 전체 길이이다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

γ_A : 분리단에서 현탁액의 안쪽 반지름

γ_B : 분리단에서 현탁액의 바깥쪽 반지름

$$H = \gamma_B - \gamma_A$$

N: 분리단에서의 스크류 피치 수 (5)

$$L = 2\pi\gamma_B N$$

피분리물의 입자가 침전되는 운동은 x 방향으로의 운동과 y방향으로의 운동이 결합된 형태이다. y 방향으로의 운동은 등속운동을 이루게 되며 x 방향으로의 운동은 원심 탈수기 입구에서 공급하는 방식에 따라 여러 가지의 운동이 가능하다. 그러나 실제로 원심 탈수기 입구에서 일정한 속도로 피분리물을 주입시키는 경우가 많으

므로 y 방향으로의 운동도 또한 등속운동을 하게 된다고 가정한다. 결국 이 가정은 실제와 부합되는 가정이다. y 방향으로의 속도 V_y 는 식 (4)의 V_c 가 되어 일정한 값을 가지고 있고 x 방향으로의 속도 V_x 는 일정한 입력 유량을 단면적으로 나눈값이 된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$V_x = \frac{Q}{HS}$$

$$V_y = V_c \quad (6)$$

여기서 S는 스크류의 피치 간격으로 높이 H와 곱하므로 해서 단면적을 이룬다.

x 방향의 길이 L만큼 진행하는데 필요한 시간을 t_x 라하고 y방향의 길이 H만큼 진행하는데 필요한 시간을 t_y 할 때 다음과 같이 구해진다.

$$t_x = \int_0^L \frac{dx}{V_x} \quad (7)$$

$$t_y = \int_{yB}^{yA} \frac{dy}{V_y}$$

이때 피분리물에 있는 입자가 분리되어 출구로 분출되지 않기 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$t_x < t_y \quad (8)$$

4.4 몸체설계과정

몸체를 구성하는 바울과 스크류를 설계하기 위해서는 피분리물성에 필요한 체류시간과 최적 "G"값을 구하고 피분리물성의 평균 SS범위를 설정하며 처리능력 Q(m³/hr)에 적합한 바울과 스크류의 설계치수를 구한다.

처리능력(유입유량)Q에 대한 설계변수는

- 피치수 N
- 피치간격 S
- 현탁액의 높이 γ_B, γ_A .
- 분리단의 길이 L
- 바울의 회전속도 $\omega = \omega_{\text{bowl}}$
- 바울과 스크류의 회전속도차는 $\omega_{\text{bowl-screw}}$ 이다.

설계순서는

가) 중력장에서 침전속도를 측정한다.

V_g : 중력장에서의 침전속도

나) 레이놀드수의 범위를 결정한다.

μ : Dynamic viscosity

$$Re = \frac{D_p \rho_p u}{\mu}$$

다) 원심력장에서 관련 설계변수들을 결정한다.

$$Q = \epsilon_c \Sigma_c V_g, \quad 0 < \epsilon \leq 1$$

ϵ_c 는 조정계수

라) 식 (12)에서 바울과 스크류의 회전속도차를 결정한다.

$$\omega_{\text{bowl-screw}} \geq \frac{2\pi N}{t_y}$$

5. 현장운전성능

인분뇨 처리장 4개소 축산폐수처리장 6개소에서 운전중인 스크류 데칸트 입구에 유입되는 유입수와 스크류 데칸트에서 분리한 후 BOD, SS를 측정하여 제거율을 계산하고 탈리케익의 함수율을 표1, 표2와 같이 측정하였다. 인분뇨, 축산폐수, 슬러지 분리용 스크류 데칸트의 처리능력 범위가 5~10m³/hr 되는 것은 유입되는 원수의 물성 즉, TS가 다양하기 때문에 제작사에서 넓은 처리 범위를 주게 된다. 스크류 데칸트의 최적 처리 TS는 3% 이내로 통상 인분뇨, 축산폐수는 1~3% 범위내에 든다.

분리가능 원심가속도는 1,200~1,800G이며 이것은 각 처리장마다 물성의 차이도 있지만 원심가속도 발생에 직접 영향을 주는 바울과 스크류 컨베이어의 회전속도 및 체류시간 조정으로 현장 설치시 별도로 setting 되어진다.

일반적으로 스크류 데칸트내 체류시간은 3분 정도이고 스크류 피치 간격은 80~120mm이며

감속비는 2~20rpm 의 범위이나 이 경우 주로 8~12rpm을 적용하였다.

인분뇨, 축산폐수 공히 유입되는 원수의 물성을 일정하지 않고 변화폭이 심하였다. 이것은 측정시점에서 인분뇨의 경우 간이 화장실 물량이 첨가될 때 높이가 나타나고, 축산폐수 공동처리장의 경우는 스크래퍼 돈사의 고농도 폐수가 많이 유입될수록 높게 나타난다.

스크류 데칸트에 유입되는 물성이 너무나 다양하기 때문에 엔지니어 감각에 의한 현장 setting 기술이 매우 중요하다. 실험실에서 지방, 단백질, 탄수화물, 무기물 등의 물성분석은 최고 3000G까지 작용하는 스크류 데칸트에서는 큰 의미가 없다고 본다.

단지 침전속도와 스크류 데칸트에서 분리후 나타나는 BOD, COD, SS, TKN, TP 등의 자료를 기준으로 최고 분리효율을 갖는 원심가속도 지점을 찾아가는 것이 중요하다.

인분뇨의 전처리에서는 응집제를 사용하지 않고 운전하였는데 BOD 제거율은 70~80% 범위이고 SS제거율은 68~78% 범위에 있으며 케익의 함수율은 70% 내외로 나타났다.

축산폐수 공동처리장은 저장조에서 생분해가 빠르게 진행되는 관계로 응집제를 투입하면서 분리한 결과 SS제거율은 98~99%로 매우 높게 되나 상당량의 유기물이 용해상태로 되어 BOD

제거율은 49~67%이며 함수율은 인분뇨 보다 약간 높은 73~78%로 나타났다.

효과적인 슬러지 제거를 위해서는 생분해가 본격적으로 일어나기 전에 분리하게 되면 SS 제거율에 상응하는 BOD, COD 수치가 되어 처리장의 부하를 줄일 수 있고 탈리케익은 양질의 유기질 비료화에 이용되어질 수 있다.

또한 침전조 발생 슬러지를 스크류 데칸트의 압착단이 생략된 농축기를 이용하여 고액분리하는 것도 효과적으로 볼 수 있다.

6. 결 언

폐수처리는 순수한 물과 혼합되어 용해, 침강, 부유상태에서 환경위해 요인을 일으키는 물질을 슬러지 형태로 제거하고 환경친화적 물질로 바꾸는 것으로 볼 수 있으며 전단부에서 기계적인 고액분리에 의해서 슬러지 제거가 성공적으로 이루어질 때 후단부의 부하를 줄일 수 있고 전체공정의 효율성이 제고되어질 수 있다. 스크류 데칸트는 프레스류 탈수기에 비해서 저침강성 슬러지를 연속적으로 처리하는데 효율적이며 내구성 또한 우수하다. 그러나 영세한 생산업체가 대부분인 국내에서는 독자 설계능력은 보유치 않고 기술선진국 제품으로부터 모방제작하여 처리장에 공급하여 왔다. 그간의 연구성과를 바탕

표 2. 처리장 설치데칸트 제원

구 분	장치명	처리능력(m ³ /hr)	바울직경(mm)	G값	스크류피치간격(mm)	차속
인 분 뇨	A	20~30	500	1800	120	11
	B	15~20	400	1500	120	11
	C	15~20	500	1800	120	11
	D	5~10	500	2200	100	7
축 산 폐 수	E	2~3	360	1800	80	20
	F	2~3	360	1800	80	20
	G	8~12	400	2200	80	12
	H	15~20	500	2500	100	8
	I	15~20	500	1800	110	11
	J	8~10	500	2100	100	7

표 3. 처리장에서의 데칸트 분리결과

시료명	유입수(mg/l)		원심분리후(mg/l)		제거율(%)		케익함수율(%)
	BOD	SS	BOD	SS	BOD	SS	
A	21289	26071	6587	8390	70	68	76.6
B	11240	7333	1508	1510	80	80	58.5
C	15073	16253	3970	4972	75	78.4	66.3
D	19269	27000	4353	6083	77	78	76.48
E	28000	19400	16800	360	60	98	78.1
F	35400	23900	17100	250	52	99	77.3
G	6375	8000	3084	190	52	98	73.8
H	7192	9750	2391	169	67	98	77.1
I	13605	12500	4676	184	66	98	76.4
J	211289	6800	5803	16	49	98	78.7

으로 만든 기계중심의 설계 알고리즘은 물성속에 포함된 여러성분들이 기후조건에 따라 변동폭이 크기 때문에 적용하는데는 어느 정도 애로가 있을 것이라고 본다. 그러므로 인분뇨, 축산폐수 등의 고농도 유기성 폐수로부터 고액분리의 성공적인 설계알고리즘을 확보하기 위해서는 해당물성이 생분해 되어진 정도에 따라 나타나는 분리특성과 상용화 응집제 종류별 투여정도에 따른 분리특성이 설계알고리즘의 파라미터로 고려되어야 된다고 본다.

참 고 문 헌

- [1] 水上浩良 “CM형 원심탈수기”, 일본, 산업기계, pp.7~9, 1994.
- [2] 여과 “공장조작 시리즈 10”, 일본, 화학공업사, 1987.
- [3] Ya. Fyulep, G. khalas, E. Monoshtori, k. polinski and k. Teresh, “Calculation of the Capacity of Centrifuges with Screw Discharge”, Chemical & Petroleum Engineering, pp.116-128, July, 1985.
- [4] M. Ungarish “Hydrodynamics of suspensions”, 이스라엘, 1993.
- [5] 日本化學工業社 “化學裝置設計data集”, pp.208~236, 1983.