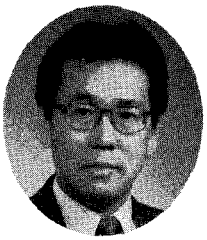
폐하수의 고도 처리

〈3〉



이상은
한국건설기술연구원 부원장

목 차

1. 서언
2. 폐수처리와 신기술
 1) Biotechnology의 이용
  생물막법, 포괄고정화법, 자기조립법
 2) 분리막의 이용
3. 생물학적 인·질소 제거
 1) 생물학적 질소 제거
  가. 세포합성에 의한 질소의 제거
  나. 질산화
  다. 탈질
  라. 생물학적 질소제거 공정
 2) 생물학적 인 제거
  가. 기본원리
  나. 생물학적 인 제거 공정
4. 폐수의 고도처리방법의 예
 1) Carousel Process
 2) TF / SC Process
 3) SBR
 4) BAF Process
 5) PACT Process
 6) MARS Process
 7) 초심층 폭기법

나. 생물학적 인 제거 공정

앞에서 설명된 개념을 이용하여 여러 종류의 생물학적 인제거 방법이 개발되어 있는데 모두 기준의 활성슬럿지 공정을 개선하여 2차처리단계에서 인을 제거하도록 변형시킨 방법들이다. 이 방법들은 기존의 활성슬럿지 line에 인제거기능을 보강한 A / O, A^2 / Om UCP, VIP 및 Bardenpho 등 Mainstream Process와 반송슬럿지 line을 이용하는 Phostrip 및 P / L Process 등의 Sidestream Process로 구분될 수 있다. 또한 이들 중에는 A / O, Modified Bardenpho, UCP, VIP 및 P / L 등은 인과 질소의 동시제거가 가능한 방법들이다.

■ A / O와 A^2 / O Process

이 방법의 기본공정도는 그림-12와 같으며 앞에서 설명한 혐기성 호기성 상태에서의 인의 방출과 섭취의 개념을 이용한 기본적인 방법이며 인을 과잉섭취하여 인 함유량이 높은 (4~6)잉여슬럿지를 폐기함으로서 인이 제거된다. 혐기성과 호기성조는 몇 개의 조로 나누어져 있으며, 많이 사용되는 방법은 혐기성조는 3단계 호기성조는 4단계로 구분되는 것인데 미국의 Air Products and Chemicals, Inc의 특허로 보호되어 있어 주의를 요한다. 기존의 활성슬럿지의 공정중 앞부분의 폭기조에 공기공급을 중단하는 등 간단한 방법으로 A / O Process와 비슷한 개념의 공정으로 변화시킬 수가 있어 기존시설의 개선방법으로 많이 사용되고 있다.

처리수의 인 농도는 불안정한 편이며 방류수의 인농

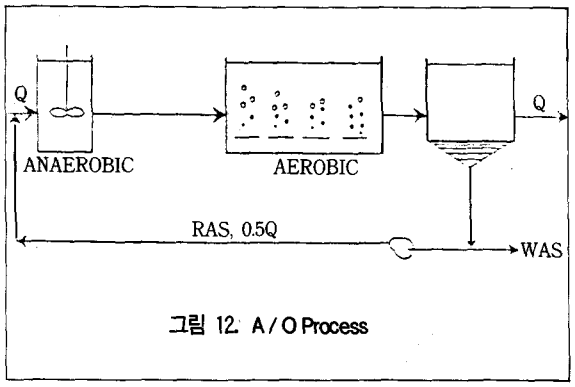


그림 12. A / O Process

도기준이 이하인 경우에는 처리수의 여과장치가 별도로 필요하게 된다. 그림-13는 A / O Process를 개량하여 질소의 제거가 가능하도록 Anoxic조를 추가한 A^2 / O 방법을 나타낸다. A^2 / O에 의해 얻을 수 있는 총질소 제거효율은 40~70% 정도이고 인의 제거는 A / O와 비슷한 수준이다.

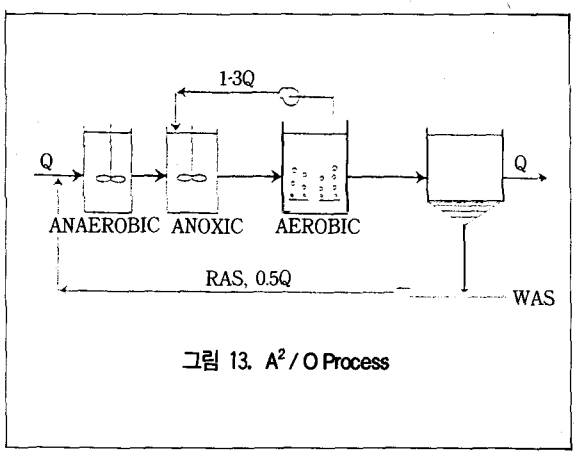


그림 13. A^2 / O Process

Modified Bardenpho

Bardenpho Process앞에 Anoxic조를 추가하여 NO_x가 혐기성 상태에서 인의 방출을 저해할 수 있는 가능성을 막고 유입수의 유기물을 분해하면서 70% 정도의 NO_x가 맨 앞의 Anoxic조에서 제거되도록 질소와 인의 제거효율을 높이도록 한 것이 그림-14에 나타난 Modified Bardenpho Process이다.

Modified Bardenpho Process를 사용하기에 적합한 유입수의 조건을 BOD / TP>20와 BOD_5 / TKN>4이며 전체적인 SRT는 6~15일 정도로 유지해 주고 있다.

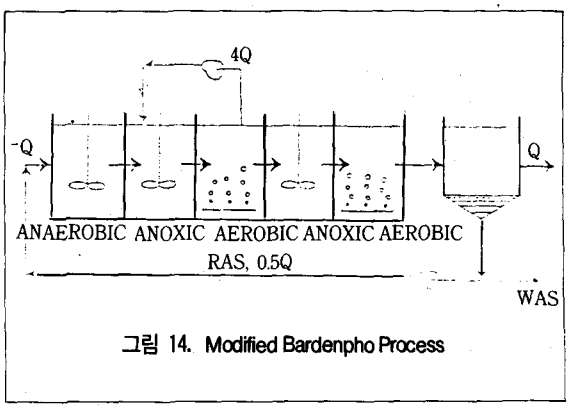


그림 14. Modified Bardenpho Process

UCT(University Capetown Process)

UCT Process는 Modified Bardenpho Process를 더욱 변형시킨 방법으로 반송슬럿지가 anaerobic조가 아니고 anoxic조로 반송되며 anoxic조로부터 anaerobic조로 반송시키는 2단계 반송을 시킨다.

이 공정은 그림-15와 같이 anaerobic조에서 nitrate 부하를 낮게 유지함으로서 혐기성 상태에서 인의 방출을 방해하지 않도록 한다. 따라서 anoxic조의 nitrate 농도를 낮게 유지하는 것이 이 process의 효율을 정하게 되며 결국 질산화를 충분히 시키지 않게 되는 경우가 많다.

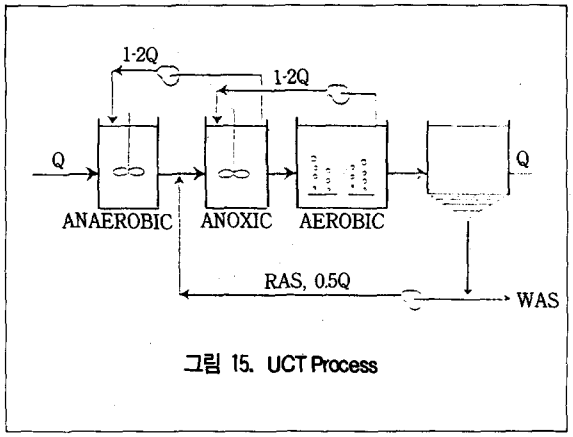


그림 15. UCT Process

이 문제점들을 보완하기 위해 Modified UCT Process가 개발되었는데 그림-16과 같이 anaerobic조와 폭기조사이에 anoxic조를 두개 설치함으로서 충분한 질산화와 탈질이 진행되도록 한다. Modified UCT Process에서 anaerobic조로의 슬럿지반송펌프는 두 a-

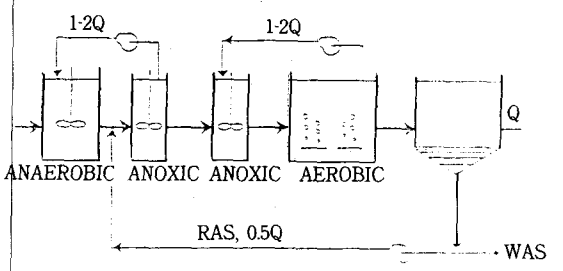


그림 16. Modified UCT Process

noxic조에 모두 연결되도록 설계하여 UCT Process조도 운전이 가능하도록 하는 것이 보통이다.

VIP(Virginia Initrative Plant) Process

그림-17에 나타난 바와 같이 VIP Process는 UCT Process와 비슷한 방법이나 다음 두가지 사항이 다르다.

1) UCT Process 각 반응조가 하나의 CSTR로 되어 있으나 VIP Process는 2개 이상의 CSTR을 직열로 배치함으로서 인의 과잉섭취 능력을 증가시킨다.

2) UCT Process의 SRT가 13-25일인데 비해 VIP Process는 SRT가 5-10일이어서 활성 biomass의 비율이 높다.

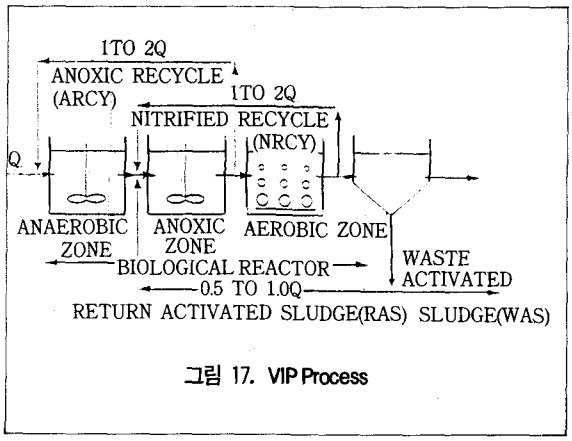


그림 17. VIP Process

Phostrip Process

A/O Bardenpho등 Mainstream Process가 인을 과잉섭취한 슬럿지를 잉여슬럿지로 폐기함으로서 인의 제거가 이루어지기 때문에 인 제거효율이 안정적이지 못한 반면 Sidestream Process인 Phostrip Process는 생물학적 인 제거와 화학적 처리를 병용함으로서 보다 안정적인 인 제거가 가능하게 한다.

그림-18과 같이 반송슬럿지의 일부가 탈인조(P-stripper)에 투입되면서 혐기성상태에서 인의 방출이 진행된다. 탈인조의 SRT는 대개 8-12시간 정도인데 Bio-P 미생물에 의한 인의 방출시에도 탈인조에서 파괴된 미생물이 인을 방출하기도 한다.

탈인조에 사용되는 세정수 또는 1차처리수와 2차처리수가 사용되기도 하고 인이 농축된 탈인조 상등액의 화학처리에는 Lime이 주로 사용되며 별도의 화학침전조가 설치되기도 하고 1차침전조에 투여되어 침전제거되기도 한다.

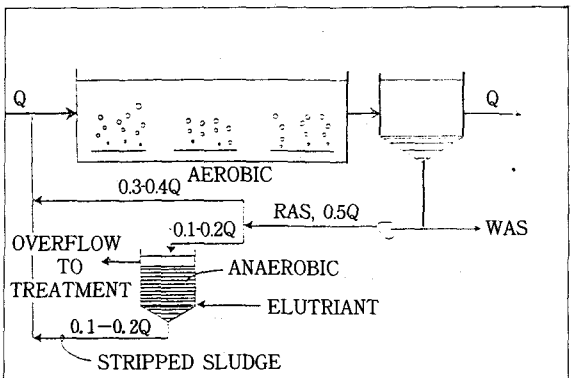


그림 18. Phostrip Process

P/L Process

P/LProcess는 국내에서 개발된 Phostrip Process의 개량방법으로 인의 제거와 동시에 질소의 제거가 가능하도록 되어 있으며 동시에 질산화 시스템에서 발생되기 쉬운 슬럿지 팽화현상을 제어하는 기능을 갖추고 있다. P/L process의 기본공정도는 그림-19와 같으며 반송슬럿지 line에 탈질조를 설치하여 질소의 제거와 nitrate가 탈인조에서의 인방출을 저해하는 것을 최소화하도록 한 것이다.

P/L Process에 의해서 인의 제거효율은 95%까지 기대할 수 있으나 질소의 제거효율은 40% 정도이면 이를 보완하기 위해 mainstream에서 질산화슬럿지를 anoxic조에 내부 반송시키는 Mmodified P/L Process(그림-20)는 85% 이상 질소제거효율을 얻고 있다.

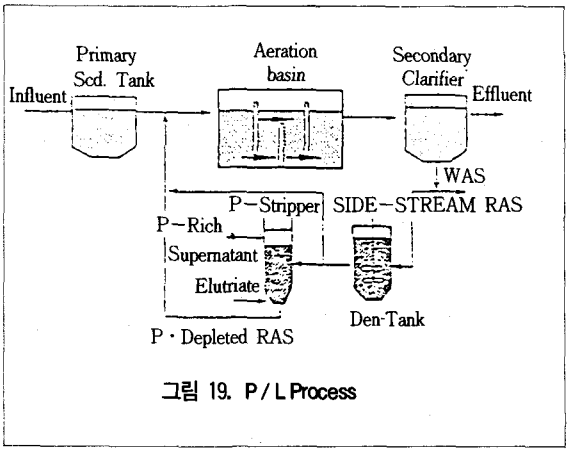


그림 19. P / L Process

폭기조 미생물의 인 과잉섭취능력을 최대한 이용하며 화학제의 소요량을 절감시키기 위해서 탈인조 상징액의 일부를 폭기조로 반송시켜 Luxury uptake가 진행되도록 하는 등 운전상의 변화를 기대할 수 있다.

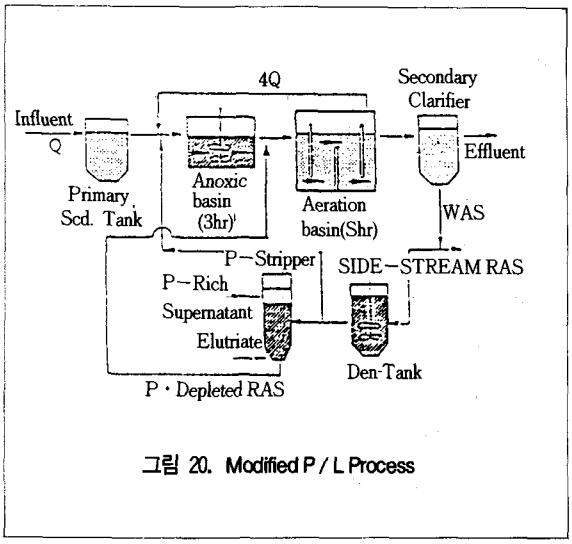


그림 20. Modified P / L Process

기타방법

• 회분식 활성슬럿지법(Sequencing Batch Reactor,SBR)

그림-21에서 보여준 SBR Process는 1900년대 초에 사용되기 시작한 방법이나 '70년대 말부터 '80년대에 이르러서 각종 자동화장치의 개발과 더불어 다시 사용되는 예가 증가하고 있다.

SBR은 하나의 반응조안에서 혐기성상태와 호기성상태가 가능하기 때문에 인의 제거가 가능하며 또한 운전상에 변화가 용이하여 특히 소규모처리에 효과적인 것으로 알려져 있으며 같은 개념으로 산화구(Oxidation ditch, OD)법 등도 인과 질소의 제거가 가능한 방법이다.

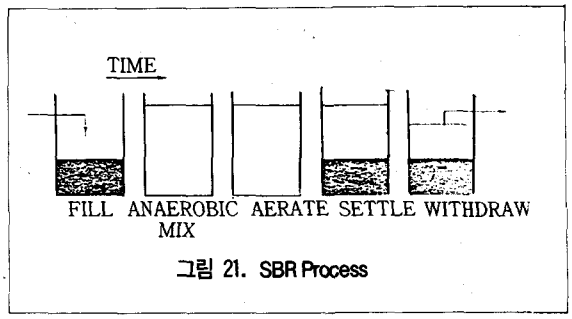


그림 21. SBR Process

• RBCOD(또는 SCFA)의 형성을 촉진시키는 공정

앞서 설명된 바와 같이 혐기성상태에서 인의 방출을 촉진시키기 위해서는 Acetate와 같은 휘발성 지방산(SCFA)를 Readily Biodegradable COD(RBCOD)가 존재해야 한다. 이를 위해서 1차침전조의 슬럿지가 1단계로 Acid fermentation을 거치도록 하여 생성된 SCFA가 많이 포함된 상등액을 생물학적 인제거 공정으로 유입시키는 등 1차 슬럿지를 이용하는 방법들이 제시되고 있다. 이 방법들의 실용성여부는 앞으로 계속 연구가 되어야 할 것이나 일부 산업폐수의 생물학적처리에 고려해 볼만한 방법이라고 판단된다.

4. 폐수의 고도처리방법의 예

1) Carrousel Process

Carrousel은 산화구법을 개량한 처리방법으로서 '60년대에 화란에서 개발되어 널리 보급되어 있는 방법이며 처리용량도 1천톤/일의 규모에서부터 백만톤/일의 규모까지 넓은 범위에 적용되고 있으나 아직 우리나라에는 적용된 사례가 없다.

그림-22는 Carrousel Process의 기본개요를 나타낸 것으로 기존의 산화구법의 여러가지 장점을 유지하면서 심층폭기의 사용에 의한 경비절감과 에너지활용 증대효과를 얻는 것을 목표로 하고 있다.

이 처리방법은 폭기조에서의 완전혼합형태와 Channel에서의 Plug flow 흐름을 유지하면서 각각의 특성

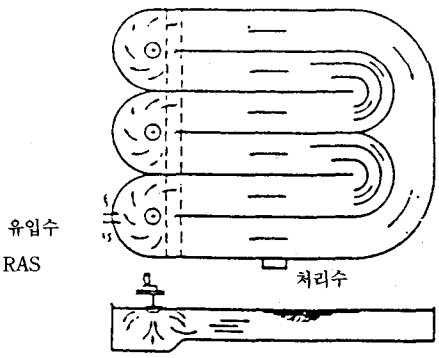


그림 22. Carrousel 시스템의 개요도

을 살리고 있고 부분적인 폭기에 의해 동력비를 절감시키는 중요한 특징을 갖고 있다.

폭기조의 완전혼합에서 Channel 유속 30cm / 초로 흐르는 유속은 유입수의 약30~50배 정도의 흐름이 되며 이에 따라 유입수가 Channel에서 반송슬럿지와 혼합되면서 엄청난 희석비를 얻을 수가 있다.

바깥 Channel의 plug flow 흐름은 plug flow로 운전되면서 얻을 수 있는 여러가지 장점을 얻게 하는데 우선 폭기조를 떠난 혼합액이 Channel에서 서서히 응집될 수 있는 시간을 주게 되어 결국 2차 침전조에서의 침전효율을 높인다.

또한 바깥 Channel의 일부는 산소공급이 중단되기 때문에 DO농도가 0에 가깝게 되어 혐기성 상태가 되는데 이 상태에서 탈질반응이 진행되며 탈질반응의 정도는 미생물의 내생호흡율과 호기성 Channel의 길이에 의해 결정되기 때문에 요구되는 총질소 제거정도에 따라 설계가 변경될 수 있다.

또한 탈질반응에서 질산을 산소대신 사용하면서 일부 유기물이 제거되므로 처리시설 전체의 산소소요량을 감소시키게 되는데 그동안의 운전결과로는 약 10%에서 25%까지의 동력비 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

표준활성슬럿지법에서는 공기공급의 목적이 산소공급과 폭기조내의 혼합에 있으나 Carrousel에서는 폭기시키는 부분이 제한되어 있어 혼합을 위한 동력공급은 표준활성슬럿지법에 비해 훨씬 적다.

만약 BOD 제거만을 목적으로 하는 경우는 SRT를 5일 정도로 유지하면 되는데 BOD 제거만을 목적으로 할 경우는 폭기장치의 조절에 의한 에너지 절감에 의한 이득외에는 큰 효과가 없기 때문에 주로 질산화를 겸하는 방법으로 설계하게 된다.

이 경우 SRT는 10~20일을 사용하게 되며 일반적으로 장기폭기방식으로 설계할 경우는 낮은 처리수 BOD_5와 완전한 질산화 및 안정된 슬럿지 생산을 위해 SRT를 30일 정도로 하고 HRT는 20~24시간으로 설계하는 것이 보통이다.

일단 SRT가 결정되면 다음 식에 의해 호기성 상태의 부피를 결정하게 되며 MLSS 농도는 약 3,500mg / L로 설계하나 유럽의 많은 Carrousel 시스템은 MLSS 농도를 4,000에서 7,000mg / L까지도 운전하고 있다.

$$V=\frac{(SRT)(Yn)(\triangle BOD)}{MLSS}$$

단, VD=탈질을 위한 부피(m^3)
N=환원될 질산성 질소양(kg / 일)
DNR=탈질반응율(kg N / kg · MLSS-일)

일반적으로 Channel의 깊이는 폭기장치 임펠레 직경의 1.2배 정도가 되며 폭은 깊이의 2배 정도가 적당하다.

아직 우리나라에는 사용되지 않는 Carrousel 시스템의 높은 처리효율이나 저렴한 유지관리비 등은 우리나라에서의 적용가능성을 높게 해준다. 특히 2차 침전조의 침전성에 관한 문제가 비교적 없는 등 운전관리가 비교적 용이하기 때문에 소규모 처리시설에 적용시키면 기술적으로나 경제적으로 효과가 클 것이며 이 방법을 잘 이해하여 현장조건에 맞게 응용하면 앞으로 강화될 처리수 기준을 경제적으로 만족시킬 수 있는 방법중의 하나가 될 것이다.

2) TF / SC Process

TF / SC process는 최근에 개발되어 최근에 미국에서 사용되는 예가 급격히 증가하고 있으나 이 방법의 모체가 되는 살수여상법(Trickling filter, TF)은 활성슬럿지법보다 먼저 개발되어 1세기 이상 사용되어 온 생물학적 처리방법이다.

이 처리방법은 미국의 EPA에서 시행하는 Innovative & Alternative(I / A) technology program의 평가를 거쳐 Innovative technology의 하나로 인정을

받아 운전관리의 문제점이 없고 높은 처리효율을 얻을 수 있다는 것이 입증된 방법이다.

운전과정에서 중요한 두가지는 우선 Solid 즉 고형물질들은 반드시 호기성이고 응집된 상태로 유지되어야 하고 2차 침전조로부터의 반송슬럿지는 살수여상 유출수와 혼합되어야만 한다는 것이다.

TF / SC Process의 첫번째 단계인 살수여상의 주된 역할은 용해된 BOD의 제거이며 Solid contact 기간은 살수여상 유출수의 작은 고형물질들과 반송슬럿지를 혼합시켜 분산된 고형물질들을 Floc으로 변화시키는 Bioflocculation의 기능과 필요한 경우에는 추가로 용해성 BOD의 제거를 하는 기능을 갖고 있다.

따라서 Solid Contact의 시간은 고형상태와 용해상태의 BOD제거 효율정도에 따라 정해진다. 그림-23은 TF / SC process의 세가지 모델을 보여주고 있는데 고형상태와 용해상태의 BOD 제거정도에 따라 여러가지 배열을 할 수 있는 것을 알게 된다. 만약 살수여상 유출수 중에서 계속 남아 있는 많은 양의 용해성 BOD 제거가 고형운전의 제거보다 더 중요한 경우에는 Model 1과 같이 호기성 Solid Contact 탱크를 사용해야 하며 만약 고형물질만이 문제가 되는 경우에는 Model 2와 같이 반송슬럿지만을 폭기시킨 후 살수여상 유출수와 혼합시키면 된다.

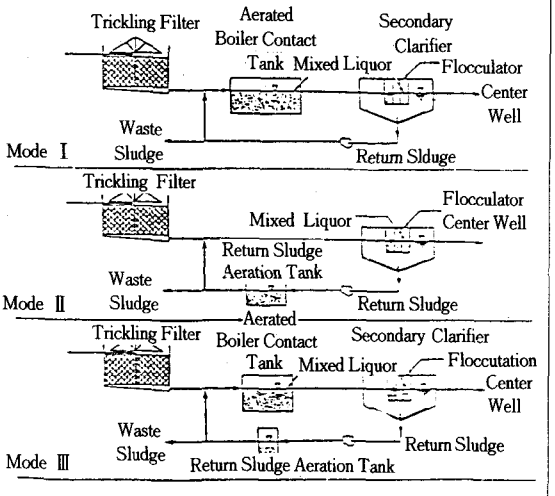


그림 23. TF / SC Process의 세가지 유형

그러나 용해성 BOD와 고형물질이 모두 문제가 되어 제거할 필요가 있는 경우에는 두가지 폭기 및 접촉장치가 다 필요하게 된다. TF / SC process의 마지막 단계는 응집단계가 되는데 Solid Contact 탱크에서 형성되기 시작한 Floc은 서서히 교반되는 2차 침전조의 중앙부에 강하고 침전성이 좋은 floc으로 자라 2차침전조에서 침전분리된다.

TF / SC Process에서의 살수여상의 주된 기능이 용존성 유기물의 제거이며 이는 유입 BOD, 여재는 표면적, 깊이, 온도 및 부하에 의해 결정되는데 BOD 제거율을 예측하기 위해서는 Velz식은 약간 변형시킨 다음의 식이 사용된다.

$$S_2=\frac{S_1}{\{(R+1)\exp[\frac{K_{20}A_sD\theta^{(T-20)}}{\{Qi(R+1)\}^2}]-R}$$

단, S_2=TF 처리수의 용존 BOD_5(mg / L)
S_1=1차 처리수의 용존 BOD_5(mg / L)
R=순환율
K_{20}=20°C에서의 1차 반응계수
A_s=여재의 specific surface, m^2/m^3
D=여재 깊이, m
θ=온도보정계수
T=폐수의 온도, °C
Q=TF 유입 flux, m^3/m^{2-sec}
n=유량과 관련된 지수

이 식을 자료분석이 보다 편하게 변형시키면 다음식과 같이 된다.

$$\ln\frac{S_b}{S_2}=\frac{K_{20}\theta^{(T-20)}A_sD}{Q^2}$$

단, S_b=순환수와 1차 처리수가 혼합된 후의 용존성 BOD_5 / mg / L
Q=총 Hydraulic flux, m^3/m^{2-sec}

따라서 TF / SC Process를 국내에 적용하기 위해서는 살수여상에의 유기물부하를 적절히 책정하고 처리목적과 유입수의 특성에 따라 TF / SC Process의 solid contact 탱크의 위치를 잘 결정하는 것이 중요하며 일반적으로 사용되는 살수여상의 유기물 부하의 범위는 0.09~0.5kg / / BOD_5/m^3 일이다.