

원형침전지 내부 유동구조에 관한 연구동향

한용운* · 류충기** · 박인호**

1. 서 언

정수 및 하폐수처리공정은 다양한 물리, 화학, 생물학적, 단위공정의 조합으로 처리공정을 구성하고 있다. 그중에서 가장 일반적인 물리적 처리 단위공정으로는 침전공정을 들 수 있는데, 침전을 개략적으로 정의하면 “입자와 혼탁 된 유체 중에서 입자만을 중력에 의하여 분리” 하는 것이라 할 수 있다. 침전공정은 침전 가능한 입자상 물질의 대부분을 중력에 의하여 제거하는 것이다. 따라서 이러한 단위공정인 침전의 제거효율성에 의하여 후속시설인 여과지, 탈수공정의 효율성향상, 최종 유출수의 수질보장 등의 영향을 끼치는 중요한 공정이다. 통상적으로 침전지의 형식으로서의 침전지의 형태에 따라, 단층, 복층, 횡류장방사각형, 원형, 상향류식 등으로 분류 할 수 있다. 침전공정의 설계 시 유의할 사항은 환경적인 측면의 고려사항과 수리학적인 고려사항이 있는데, 그중에서 중점적인 고려사항들은 유입 수질, 부유입자의 침강속도, 침전지의 형식과 형상, 지내 단락류의 발생여부, 유입부와 유출부의 Design, 슬러지배출 방법 등을 고려하여야 한다. 따라서 본 원고에서는 특히 침전지의 형상 입유출부, 및 원형침전지의 내부유동에 대한 국내의 연구동향을 소개하여 원형침전지 설계 시 조그마한 도움을 주고자 한다.

2. 원형침전지의 일반적 사항

액체 내에 포함되어 있는 입자는 유동이 비교적 안정된 상태에서는 액체와의 비중차이에 의해 바닥으로 침강하거나 수면위로 부상하게 된다. 이러한 유체정역학적 특성은 폐수나 하수를 처리하여 정수하는데 큰 역할을

하게 되는데, 즉, 침전지 내로 유입된 현탁액에 포함된 고형물 중 액체보다 밀도가 높은 것들은 침전지 바닥으로 침강하여 적체되고 액체보다 밀도가 낮은 것들은 수면위로 부상함으로써 침강되는 고형물과 부상물질을 제거하면 비교적 맑은 물을 얻을 수 있다. 이러한 원리에 의해 침강처리는 행해지며, 궁극적으로 현탁고형물 함유량을 감소시키는 것이 그 목적이다. 이때 안정된 유동의 통제와 적절한 침전시간이 요하게 되는데 이것이 침전효율의 가장 큰 요인으로 작용한다. 최근 설치운용되는 침전지의 종류에는 형상에 따라 직사각형, 정사각형 및 원형이 있고, 유체 흐름의 방향에 따라 평행류와 방사류가 있다. 이중에서 원형침전지는 유입되는 부하가 균등하지 않는 단점이 있으나 침전된 슬러지의 체류시간이 짧고 슬러지 수집장치가 간단하며 유지비가 적게 든다. 또한 공간 활용도가 높아 도심지, 택지 혹은 공장 단지 내에서 중소형의 침전지로 사용될 경우 매우 유리하다. 침강처리 하고자 하는 폐수나 하수의 공급위치에 따라 중앙 공급식(center-feed design)과 주변 공급식(rim-feed design)으로 구분되어지며, 중앙 공급식의 경우 현재 유입정(feed well)을 침전지 가운데에 설치하여 공급하는 방식을 많이 채택하고 있는 실정이다.

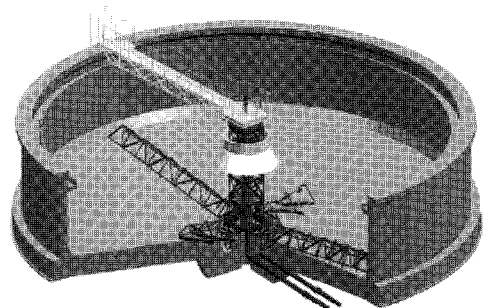


Fig. 1 원형침전지의 일반적 형상(SY-CSC)

* 영남대학교 기계공학부

** (주) 삼영이엔티 기술연구소

Fig.1과 같이 원형침전지는 중앙의 슬러지 유입관을 통하여 슬러지가 유입되어 유입관의 유출chamber를 통하여, 유입정(feedwell)에서 유입슬러지의 유속을 안정화시켜 침전지하부로 배출한다. 침전지내에서 입자와 유체가 침강분리 후 깨끗한 물은 측면의 유출웨어 배플을 통하여 배출시킨다, 또한 침전지의 구조물적인 하부형상은 하부중심을 기준으로 약 5/100 ~10/100의 경사slope를 형성의 역com형태로, 침강슬러지가 자연스럽게 중앙의 호퍼로 수집되도록 하며 기계적인 제거장치가 있는 경우호퍼를 중심으로 회전하는 슬러지제거기를 설치한다. 침전지의 유입관을 통해 유입되어진 유입수는 침전지 면적의 3% ~ 4% 크기의 feedwell에 모인 후, 방사상의 원주방향으로 흘러 침전지측면벽체를 타고 일부는 웨어(weir)로 유출되고 일부는 유입정 쪽으로 선회류를 형성한다.

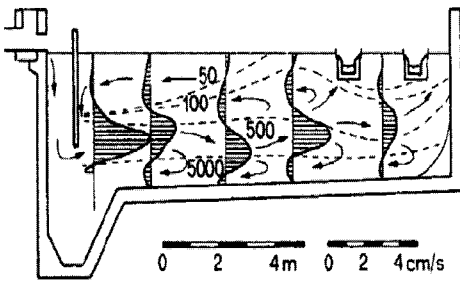


Fig. 2 침전지내 일반적인 유동패턴 (Bretscher et al., 1992)

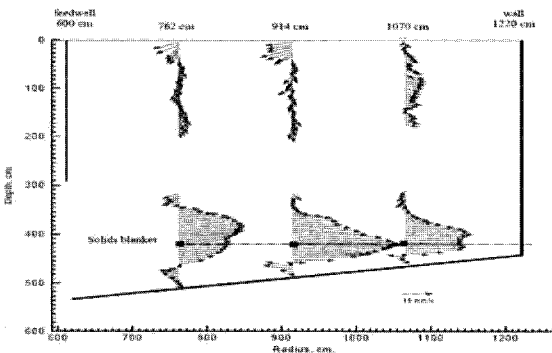


Fig. 3 침전지내 ADV측정에 의한 속도분포 (Kinnerar & Deines 2001)

유입정 하단부로 하강하는 유동의 평균속도는 0.01~0.03m/s로 익히 알려져 있다. 유입정을 빠져나가면

서 하강하는 유속의 분포는 균일한 것이 유리하지만, 유입정 내에 jet류 및 농도구배, 유입정구조물 등의 요인으로 인하여 와류가 발생할 경우 유선이 콘크리트벽면에 부착하여 국부적으로 속도를 증가시켜 단회로의 위험성이 존재한다. feedwell을 빠져나온 고농도의 유입수는 유입관을 타고 수직 하강하여 호퍼로 향하게 되는데, 이러한 유동의 진행방향은 원형호퍼내에 적체된 슬러지를 교란하여 재부상시키는 결과를 초래하므로 바람직하지 못하다. 반경방향 거리 2m이후에 유동은 비교적 고요한 상태를 이루게 되는데, 이 공간(전체 체적의 98%)에서 비중 차이에 의한 자연 침강 및 부상이 일어난다. 비중이 액체보다 크고 응집되지 않은 독립 입자의 침전속도는 중력에 의한 입자의 침강력(F)이 액체의 항력(F_D)과 같게 될 때까지 가속된다. 또한, 적절한 들뜸 속도(scouring velocity)의 설정은 부상물질의 침강을 억제하고 슬러지의 재부상을 막는 중요한 역할을 하게 되는데. 이때 임계속도는 Camp가 유도한 식 (1)과 같다.

$$V_H = \left[\frac{8k(s-1)gd}{f} \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서,

V_H : 들뜨기 시작하는 수평유속

s : 입자의 비중

d : 입자의 지름

k : 들뜨는 물질의 종류에 따른 상수(0.04~0.06)

f : Darcy-Weisbach 마찰인자(0.02~0.03)

위 식에서 입자의 지름이 커지면 임계수평유속은 증가할 수 있다. 임계유속의 증가는 단위 시간당 하수처리 용량의 증가를 의미하므로 입자간의 응집을 유도하여 플록의 지름을 키우는 것은 매우 유익하다. 익히, 침전지 내에서의 적절한 속도구배에 의해 발생하는 와류는 식(2)와 같은 관계식으로 표현되는 전단응력을 발달시켜 미세 입자들 간의 응집을 촉진시켜 플록형성에 도움이 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 예측된 유동장 내에서 전단 응력 장을 구체적으로 얻게 되면 응력 장을 제어하는 인자에 대한 예측 역시 가능하므로 침강 효율을 제어할 수 있는 구조를 효율적으로 얻을 수 있게 된다.

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \quad (2)$$

여기서,

- τ : 전단응력
- μ : 하수의 점성
- u : 유속의 x 방향 성분
- v : 유속의 y 방향 성분

이상과 같이 원형침전지를 설계할 때 고려하여야 할 되는 몇 가지의 비효율적 요소를 안고 있는데 이들은

첫째, 침전지 내의 방사상흐름은 단위체적당 입자경로 (particle path)가 길지 않으며, 탱크바닥에 적체되는 슬러지의 분포가 고르지 않을 수 있다.

둘째, 유입관에서 빠져나온 유체는 유입정을 만나 와류를 형성한 후 유입관 콘크리트벽면을 타고 수직 하강하게 되는데, 이러한 유동은 원형 호퍼 내에 적체된 슬러지를 교란하여 재 부상시키는 결과를 초래하므로 유선의 방향 수정이 요구된다.

셋째, 입구면적이 좁아 탱크내로의 혼탁액 유입속도가 너무 빠르다. 이로 인해 단회로(short circuit)의 위험성이 있고, 유입정 내부에서 발생하는 급한 속도구배와 압력의 급증하는 유동의 불안정한 요소로 작용하므로 중심부 구조물에 피로를 증가시키게 된다.

넷째, 전단응력이 탱크 중심부와 바닥에 국부적으로 분포되어 있어, 고형물 제거효율이 유체역학적 측면 (액체와 고형물간의 비중차에 의한 침강)에 편중되어 있음을 의미한다. 따라서 동역학적 요소를 가미한 원활한 플록 형성을 위해서는 개선의 여지가 있다.

3. Coanda효과를 이용한 원형침전지

위에서 서술한 몇 가지의 단점을 보완하기 위해 기존의 원형침전지에서 유체역학의 이론 중의 하나인 코안다(Coanda) 효과를 적용한 침전지를 제시하였다. 코안다(Coanda) 효과는 노즐출구 하류의 벽면이 볼록면인 경우에도 벽면 분류는 상당한 범위에 걸쳐서 벽면을 따라서 흐르는데, 이때 얻은 모멘텀에 의하여 벽면을 떠났을 때에도 그 방향을 유지하므로 유로의 방향을 자연스럽게 바꿀 수 있는데 이것을 코안다 효과라고 한다.

기존의 Feed Well형의 상기에서 살펴본 바와 같이 유동도입부에 의한 유동장의 형태는 유입수의 농도 및

침전지내의 농도차이에 의한 단경로를 유지하여 인자들의 제어 폭이 좁아지는 반면에 선회유동을 유발시키는 Divergent Nozzle 형태의 도입부를 사용함으로써 유동 경로를 길게 유지하며 다양한 유동상태를 조절할 수 있는 민감도가 확대됨으로서 침강효율을 높일 수 있는 방법으로서 본 장에서 서술한 이 과정을 적용해 볼 필요가 있다.

4. 실험 방법

본 연구를 위한 실험조건은 크게 유막법에 의한 Streak line을 추적한 유동가시화, CFD 상용코드를 활용한 유입정의 최적화 및 LDV를 이용한 유동벡터의 추산의 3가지 방법으로 분류된다.

우선, 선정된 침전지의 기하학적 형태는 가장 보편적인 침전을 선정하여 반경 13m, 중심 깊이 6m, 원주깊이 4m인 원형침전지를 모델로 선정하였으며 밑면의 경사도는 12 : 1의 크기를 유지하는 경우로 가정했다. 중심의 하수 유입정 및 침강우물의 크기는 전체직경의 1/7의 크기를 갖는 경우로 선정되었다. 이러한 표본은 중앙 공급식으로 설치된 A 하수처리장으로서, 침전지 1지당 시설용량 13,500m³/day, 청정시의 시간당 평균 하수량 562.5m³/hr을 가지는 원형침전지로서 Fig. 4에 개략적으로 도시한 바와 같이 본 침전지는 원형 우물, 웨어, 스크레이퍼와 구동장치 등으로 구성되어 있으며, 연구대상은 스크레이퍼를 배제한 상태에서의 침전지 내의 유동특성이다.

기존의 원형천정에 갓을 두른 형태로서 수직상승류의 방향을 180°선회시키는 방법으로 사용하였던 Feed-well

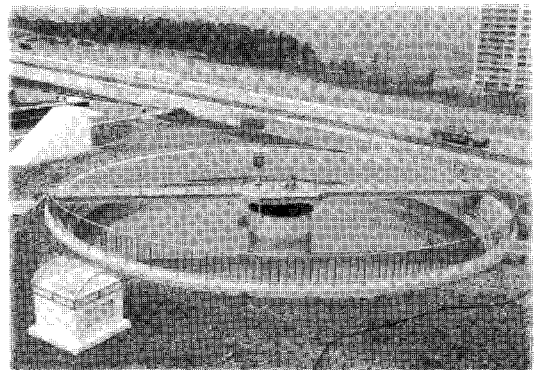


Fig. 4 Photograph of Sedimentation Tank with a Feed Well inlet tube

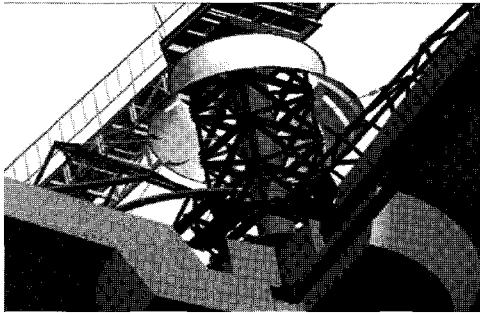


Fig. 5 Schematic Drawing of New-feedwell

(이하 FW로 표기)형의 유입정을 장착했을 때, 얻어진 자료를 기초로 하여 표본을 삼았다. 확대노즐관과 16개의 출구배인으로 구성된 Divergent Nozzle(이하 DN으로 표기)형을 제작하여 출구배인각의 변화에 대하여 자연스런 선회유동이 발생되도록 하였다. 본 실험을 위하여 구성된 장치는 Servo Tank, 유량계, 침전지 1/7 모델 및 광학장비와 계측장비들로 구성되어 있다.

4.1 가시화 실험 결과

FW와 DN의 비교실험을 통하여 얻어진 유적선의 결과를 Fig. 6 및 7에 각각 나타내었다. 그림들은 유입정에서 저수조로 유입되는 경우의 각각의 유입상태를 수직면 상에서 촬영한 것으로서, FW의 경우 수직각의 코너(corner of feed-well cap) 부분에서 이미 난류가 충분히 발달하고 반발에 의하여 수직 하향하는 유동구조를 나타낸다.

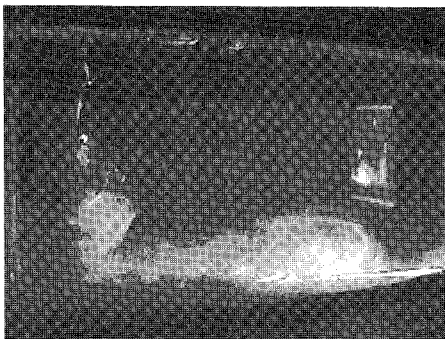


Fig. 6 Visualization of Streak lines captured by the laser sheet in rz-plane of Feed well type inflow device

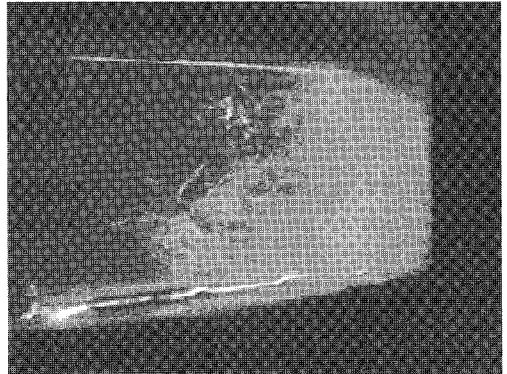


Fig. 7 Visualization of Streak lines captured by the laser sheet in rz-plane of DN type inflow device

반면에, DN에서는 나팔관의 표면을 따라서 이루어지는 코안다 효과에 의하여 자연스런 하향유동이 만들어지고 상당한 동안 층상의 구조가 유지되어 침전지의 슬러지 부상을 억제하는 효과를 예상할 수가 있어서 유리한 것으로 관찰된다.

4.2 CFD 실험 결과

DN형의 유동특성을 살펴보기 위하여 출구쪽(Tulip Exit)과 수집관(Receiving Pipe) 근처를 조밀격자로 만들어 계산하도록 하였다. 한편, 코안다 튜입형의 유입관 구조는 그 크기와 형상 등이 잘 알려져 있지 않기 때문에 본 연구의 목적을 위하여 적절한 형태 및 치수를 결정하였다. 이 때, 선정된 기하학적 구조는 일정량의 유량에 대하여 DN 출구에서 침전지 내의 유로가 가장 길고 가능한 여러 개의 큰 와류 형상이 나타나도록 제시된 유출조건으로 선정하여 유체에 동반된 미립 침강물질이 오랜 동안 체공할 수 있는 조건으로 최적화 시켰다. 이러한 방법은 그 효율성이 검증되지 않았지만 유체의 절대속도가 침강을 재부상 시키지 않는 경험적 속도 내에서 안정조건에 만족되도록 하였다. Fig. 8은 DN의 계산된 벡터장과 유선군을 나타낸 것으로 출구 면에서 코안다 곡면에 따라 만곡된 하향유동이 발생되어 코안다 효과를 가지는 모습을 관찰할 수 있다. 따라서 출구를 빠져나오면서 하향한 유동은 침전지의 중간 반경영역에서 반대방향의 큰 선회유동을 이루면서 FW에 비하여 길어진 경로를 가지는 것으로 확인될 수 있다. 또한, DN 출구에 선회류를 얻을 수 있도록 각을 가지는 안내깃들을 설치하여 선회류까지 발생되도록 유도하였다.

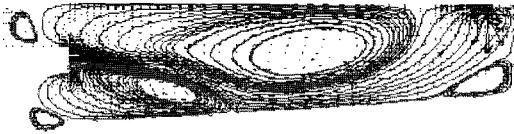


Fig. 8 Streamlines and velocity vectors in rz plane of DN

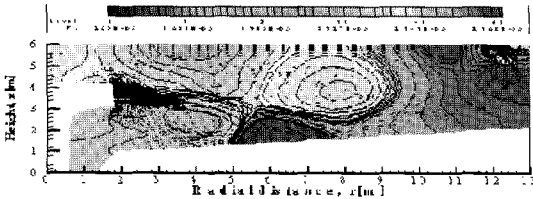


Fig. 9 Velocity field and Pressure contour on rz-plane of DN

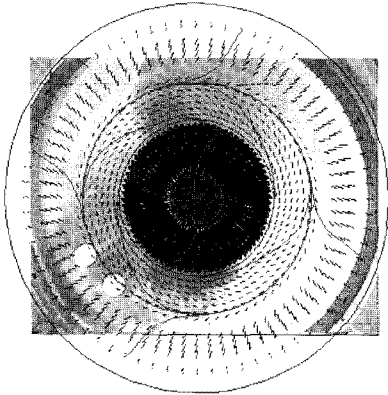


Fig. 10 Top view of superposed images by streak lines and velocity vectors of DN

이렇게 만들어진 유로는 와류특성에 원주방향의 회회성분이 동시에 발생하므로 3차원적으로 충분히 긴 유로를 형성하여 FW이 가지는 단회로의 결점을 없앨 수 있는 성능을 가진다.

4.3 LDV 실험 결과

2차원 유동계측장비로서 활용된 LDV 장치는 주로 가시화 실험에서 laser sheet를 만들어 단면의 유동성을 계측하는 광원으로서의 역할로 실험에 사용되었으나 속도장의 계측에는 적절하게 활용되지 못하였다.

본 실험에서는 부유물질(Seeder)로서 현재까지 저속에서 가장 회상력이 우수한 것으로 알려진 Hollow glass를 사용하였다. 이 부유입자는 직경이 8~12 μ m

정도이고 비중이 1.05~1.15 로서 정수처리 대상의 혼탁액의 조건에 가까운 입자의 조건을 갖춘 것으로 생각된다. 그러나 그 조성이 유기물을 함유한 성분을 가지고 있기 때문에 물에 침수되어있는 동안에 그 조성이 서서히 변하여 부피변환을 동반하므로 약 15분 정도의 측정시간 내에서만 초기조건이 유지된다. 따라서 제한된 시간 내에 실험이 완결되어야함은 물론 반복하여 사용할 수 없는 문제를 갖고 있다.

5. DN의 장점

FW형이 가지는 단회로 및 입수정 근처에 집중하는 불균질 슬러지 분포는 슬러지 제거 시에 스크레이퍼의 특정 부분에 하중 증가와 회전 운동에 공급된 동력에 비하여 비효율적이고 슬러지의 재부상들의 문제들이 예측되나 DN형을 사용할 경우 대부분의 문제들이 해결된다. 특히, 단회로의 유로길이가 DN의 출구배인 각이 15°를 선택할 경우에 단면적으로 직선으로 가정했을 경우에도 3.5%, 30°를 선택할 경우 16% 정도의 유로가 신장되어 슬러지가 침강할 수 있는 시간이 길어지며 실제의 경우에는 곡선이 이루어지므로 좀 더 길어진다. 이들의 변화는 침전지 밑면의 점착조건에 의하여 형성되는 속도구배가 FW보다 완만해지므로 적절한 속도구배에 의한 전단응력 조건이 용이하게 조절되어 플록형성에 민감한 조건을 수시로 조절할 수 있는 기능도 제시한다. 또한, 초기유출방향이 기울어져있기 때문에 침전지 유동이 상시 저속의 거시적 회전 유동이 되므로 슬러지 수집기에 소요되는 동력을 감소시킬 수 있게 되며 균질한 침강에 의하여 수집기의 하중분산이 이루어져 유리하다. 따라서 다음과 같은 장점을 요약할 수 있다.

1. 동일유량에 대하여 침전지내 유로를 길게 할 수 있다.
2. 유량조절 뿐만 아니라 배인 각의 조절에 의하여 플록형성에 도움이 되는 속도구배를 조절할 수 있다.
3. 침전지 밑면 전체에 걸쳐 균질한 슬러지 침강을 유도할 수 있다.
4. 침전지 전체에 걸쳐 상시 저속의 회전 유동조건을 제시하여 소요동력을 절감 할 수 있다.
5. 유입정의 압력강하치가 FW형보다 매우 적기 때문에 유량공급용 펌프의 동력이 절감된다.

6. 향후 개선점

위의 실험 결과에 의하면 Divergent Nozzle 형의 유입방식을 선정하는 것이 모든 면에서 유리한 조건을 제시하지만 이상적인 조건을 찾기에는 동일한 많은 연구가 연속되어야 한다. 따라서 향후 연구되어야 되는 대상으로는

1. DN 형식을 나팔(horn)형으로 할 것인지 본 연구와 같은 천장을 가지는 캡(cap)형으로 할 것인지 검증을 필요로 한다.
2. 침전지 크기에 따라서 상단부 및 하단부의 영역에서 충분한 회전을 동반하는 DN 출구면의 위치(깊이)를 최적화할 필요가 있다.
3. 일정시간 동안의 처리용량에 따르는 DN베인각을 고정익 또는 변동익으로 처리하여 최적화 한다.
4. 플록 형성에 도움을 주는 속도구배 조건을 수집하여 유량과 베인 각의 함수관계를 모델링 한다.
5. 장시간 운전 시에 동반되는 선회류를 형성하기 위한 소요동력을 예측하여 경제적 이득을 전략화 할 필요가 있다.
6. 본문에서 기술된 내용을 근거로 할 때, DN형의 침전지는 같은 용량 처리에 대하여 침전지의 크기가 줄게 되는 효과가 있으므로 상품화에 따르는 표준화 과정을 모사해 볼 필요가 있다.

7. 결론

본 연구에 의한 연구결과를 토대로 간략한 결론을 요약하여 정리하면, 기존의 FW형의 유입관 형상이 갖는 대부분의 단점들은 DN형으로 대체될 경우, 유로의 증가, 선회류의 발생, 전단조건의 조절가능확보 및 소요동력의 감소 등의 상당히 많은 부분에서 문제점들이 해소됨을 확인 할 수 있었다. 따라서 기존 침전지에 단순히 DN형의 유입관을 적용함으로써 원형침전지 내에 자연스런 선회유동을 발생시켜 침강효율을 상승시킬 수 있을 것으로 기대되며 필요에 따라 변동 베인 각을 사용함으로써 전단응력장을 제어할 수 있는 가능성을 확인하였다. 따라서 FW과 동일 효율을 가지는 침전지를 제작할 경우 침전지의 크기를 줄일 수 있으므로 매우 경제적이며 공간 활용도가 높은 침전지가 될 것으로 기대되어 새로 제작되는 침전지뿐만 아니라 기존의 FW형의 침전지를 DN형의 침전지로서 개선도 시급한 것으로 판단된다.

또한, DN형의 유입관을 선정할 경우, 1차적인 기준으로서 FW형의 유입관과 같은 갓 크기를 유지하여 베인 출구가 위치하도록 제안할 수 있으며 16개의 베인으로서 베인 각은 15-20. 전후의 값이 유리할 것으로 확인되었다. 이 때, DN 형상은 Horn 형보다는 Cap형상이 유리한 것으로 관찰되었고 Cap형의 천정면은 자유수면으로부터 1.7m 깊이(약 침전지 중심 깊이의 1/3)에 위치하는 것이 바람직한 것으로 관찰되었다.

마지막으로, LDV실험에 의하여 선회 속도장을 관측하는 것은 성공하였으나 본 실험과 같이 너무 저속인 조건에서는 계측용 입자(Seeder)조건이 바뀌어지므로 적절한 입자의 선정이 매우 중요한 것으로 확인되었으므로 향후 이 부분에 대한 방대한 실험 자료가 요구된다.

후 기

본 고찰은 원형침전지의 선진연구사례 및 국내 연구 사례고찰을 통하여 미력하지만 원형침전지 효율향상을 위한 도움이 되었으면 합니다. 또한 본 내용의 인용 저자에게 후기를 통하여 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) AWWA(1997) "WATER TREATMENT PLANT DESIGN," pp. 128~130.
- (2) Bob de CLERCQ(2003) "Computational Fluid dynamics of settling tanks :Development of experiments and rheological,settling,and scraper submodels ".
- (3) D.Keine, B.D Reddy(2003): Finite element analysis of flow in secondary settling tanks".
- (4) 한용운, 류충기 외(2000), "코안다효과를 응용한 원형침전지 개발"
- (5) 동화기술(1995), "폐수처리공학".
- (6) Susumu Kawamura저, 수도연구회, 강창호, 고인준, 김기성, 김형업, 손창섭, 신원우, 이희성, 최상일, 최승일, 한무영, 현인환 공역(1997), "정수 시설의 최적설계 및 유지관리", (주)그린테크노.
- (7) Camp.T. R.(1946), "Sedimentation and the Design of Settling Tanks", Trans. ASCE.