

# 원형 침전지에서의 유동 구조에 관한 실험적 연구

한용운\* · 조형건\*\* · 류충기\*\*\*

## Experimental Investigation of the Flow Structure of Circular Sedimentation Tank

Yong-Un Han\*, Hyung-keon Cho\*\*, Chung-gi Ryu\*\*\*

**Key Words** : Feed well (유입정), Coanda effect (코안다 효과), Divergent Nozzle (나팔형 노즐), Sedimentation tank (침전지), Streak Line (유맥선), CFD (Computational Fluid Dynamics ; 전산유체역학), LDV (Laser Doppler Velocimeter ; 레이저 도플러 유속계)

### 1. 서 론

산업의 급속한 발달로 현재는 도심지까지 공장이 들어서 환경의 오염은 날로 심각해지고 있다. 특히, 하천으로 방류되는 공장의 폐수, 가정용 오수 등은 수질 오염의 주범으로서 생태계 파괴는 물론 심지어 인간의 생명까지 위협하고 있다. 이로 인해 하수, 상수 및 폐수의 정수작업은 주거생활의 근간이 되며, 처리시설의 공간적 효율과 성능향상에 대한 방안이 중요한 과제로 대두하고 있다.

본 연구에서는 하수처리 중 일, 이차침전지 및 농축조로 사용되는 원형침전지의 문제점을 검토하고, 유체 역학적 접근을 통해 새로운 모델을 제시하며, 두 침전지간의 효율성을 비교하고자 한다.

### 2. 실험 목적 및 범위

최근 설치·운용되는 침전지의 종류에는 형상에 따라 직사각형, 정사각형 및 원형이 있고, 유체 흐름의 방향에 따라 평행류와 방사류가 있다.

\* 영남대학교 기계공학부  
\*\* (주) 제일엔테크 기술연구소  
\*\*\* (주) 제일엔테크 기술연구소

원형침전지의 경우 단회로(short circuiting)가 발생하거나 슬러지 수집기에 가해지는 고형물 부하가 균등하지 않은 단점이 있으나 침전된 슬러지의 체류시간이 짧고 슬러지 수집장치가 간단하며 유지비가 적게 든다. 또한 공간 활용도가 높아 도심지, 택지 혹은 공장단지 내에서 중·소형의 침전지로 사용될 경우 매우 유리하다. 침강처리하고자 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.

유입정(feed well)을 설치한 기존의 원형침전지는 원형 우물, 웨어, 스크레이퍼와 구동장치 등으로 구성되어 있으며, 탱크 중앙의 콘크리트 관을 통해 유입되어진 하수가 침전탱크반경 약 1/7 크기의 원형 우물에 모인 후, 방사상의 원주방향으로 흘러 하수 일부는 웨어(weir)로 유출되고 일부는 유입정 쪽으로 리턴 된다. 유입되어진 하수가 우물 벽을 만나면서 강한 와류와 급한 압력구배를 형성하는데 이러한 불안정한 유동은 우물 벽과 구동장치에 피로를 가중시키므로 우물과 구동장치의 지지대 설계 시 충분히 고려되어야 할 부분이다. 유입정 하단부로 하강하는 유동의 평균속도는 0.01~0.03m/s로 익히 알려져 있다. 유입정을 빠져나가면서 하강하는 유속의 분포는 균일한 것이 유리하지만,

유입정 내에 와류가 발생할 경우 유선이 콘크리트벽면에 부착하여 국부적으로 속도를 증가시켜 단회로의 위험성이 존재한다. 우물을 빠져나온 하수는 유입관 콘크리트벽면을 타고 수직 하강하여 호퍼로 향하게 되는데, 이러한 유동의 진행방향은 원형 호퍼 내에 적체된 슬러지를 교란하여 재 부상시키는 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<sub>D</sub>)과 같게 될 때까지 가속된다.

$$F = (\rho_s - \rho)gV, F_D = C_D A \rho \frac{V_s^2}{2} \quad (1)$$

여기서,

- F : 입자의 침강력
- F<sub>D</sub> : 항력
- C<sub>D</sub> : 항력계수
- ρ<sub>s</sub> : 입자의 밀도
- ρ : 액체의 밀도
- A : 속도방향의 단면적
- V : 입자의 부피
- V<sub>s</sub> : 입자의 침전속도
- g : 중력가속도

식 (1)에서 만약 입자의 침강력과 액체의 항력이 같아져서 정상상태에 도달하였을 때 입자의 침전속도는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} (\rho_s - \rho)gV &= C_D A \rho \frac{V_s^2}{2} \\ V_s &= \sqrt{\frac{2g(\rho_s - \rho)V}{C_D \rho A}} = \sqrt{\frac{2g(\rho_s - \rho)}{C_D \rho} \cdot \frac{(\frac{\pi}{6})d^3}{(\frac{\pi}{4})d^2}} \\ \therefore V_s &= \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho)d}{3C_D \rho}} = \sqrt{\frac{4g}{3C_D}(s-1)d} \quad (2) \end{aligned}$$

또한, 적절한 들뜸 속도(scouring velocity)의 설정은 부상물질의 침강을 억제하고 슬러지의 재 부상을 막는 중요한 역할을 하게 되는데, 이때 임계속도는 Camp가 유도한 식 (3)과 같다.

$$V_H = \left[ \frac{8k(s-1)gd}{f} \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서,

- V<sub>H</sub> : 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 하수 처리 용량의 증가를 의미하므로 입자간의 응집을 유도하여 플록의 지름을 키우는 것은 매우 유의하다. 익히, 침전지 내에서의 적절한 속도구배에 의해 발생하는 와류는 식(4)와 같은 관계식으로 표현되는 전단응력을 발달시켜 미세 입자들 간의 응집을 진전시켜 플록 형성에 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.

$$\tau = \mu \left( \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \right) \quad (4)$$

여기서,

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

이상의 전술한 바를 요약하면, 기존의 시스템은 다음과 같이 나열되는 몇 가지의 비효율적 요소를 안고 있는데 이들은

첫째, 침전지 내의 방사상흐름은 단위체적당 입자 경로(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 적체

된 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 속도 구배와 압력의 급강하는 유동의 불안정한 요소로 작용하므로 중심부 구조물에 피로를 증가시키게 된다.

넷째, 바람의 영향으로 웨어 윌류 부하가 일정치 않으며 스킴의 유출가능성이 있고 유출유량제어가 곤란한 것도 웨어를 사용하는 침전지의 단점이다.

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

위에서 서술한 몇 가지의 단점을 보완하기 위해 유체역학의 이론 중의 하나인 코안다(Coanda) 효과를 적용한 침전지를 제시하고자 한다. 노즐출구 하류의 벽면이 볼록면인 경우에도 벽면 분류는 상당한 범위에 걸쳐서 벽면을 따라서 흐르는데, 이때 얻은 모멘텀에 의하여 벽면을 떠날 때에도 그 방향을 유지하므로 유로의 방향을 자연스럽게 바꿀 수 있는데 이것을 코안다 효과라고 한다. 원통면상의 2차원 벽면 분류에서 레이놀즈수가 충분히 클 때의 박리각  $\theta$ 는  $210^\circ \sim 220^\circ$ 이다. 2차원 자유분류가 벽면 가까이에 있을 때에는 분류축이 벽면 방향으로 휘어지고, 결국에는 측벽에 부착하게 되는데 이것도 코안다 효과의 한 형태이다.

코안다 효과를 적용한 원형침전지는 기존의 처리장치 구성요소 중에서 유입정과 웨어를 제거하고 Divergent Nozzle, 잠수형 유출관(submerged pipe) 및 outlet chamber 등을 추가시키게 된다. 침전지는 일단 건설되면 개조가 곤란하고 그 효과가 장기에 걸쳐 나타나므로, 초기의 설계 및 설치가 매우 중요하다. 코안다 효과를 이용한 원형침전지의 기하학적 형상에 관련된 주요설계인자로는 탱크반경에 대한 Divergent Nozzle의 상대적 반경, 폭, 곡률반경, vane각 및 자유수면과 바닥면 사이에서 최대유속의 위치 등이 있다.

일반적으로, 침전지 내에서 발생하는 고형물의 침강효율은 유체의 유동형태와 속도에 매우 민감하게 반응한다. 즉, 체류시간, 표면부하율, 윌류 웨어 부하율 등은 유속에 의해 정해지는 인자들로서, 침강효율을 높일 수 있는 관건이 된다. 따라서 기존의 Feed Well형의 유동도입부에 의한 유동장의 형태는 단경로를 유지

하여 인자들의 제어 폭이 좁아지는 반면에 선회유동을 유발시키는 Divergent Nozzle 형태의 도입부를 사용함으로써 유동경로를 길게 유지하며 다양한 유동상태를 조절할 수 있는 민감도가 확대됨으로서 침강효율을 높일 수 있는 방법으로서 본 장에서 서술한 이 과정을 적용해 볼 필요가 있다.

### 3. 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 13,500m<sup>3</sup>/day, 청정시의 시간당 평균하수량 562.5m<sup>3</sup>/hr을 가지는 원형침전지로서 Fig. 1 에 개략적으로 도시한 바와 같이 본 침전지는 원형우물, 웨어, 스크레이퍼와 구동장치 등으로 구성되어 있으며, 연구대상은 스크레이퍼를 배제한 상태에서의 침전지 내의 유동특성이다.

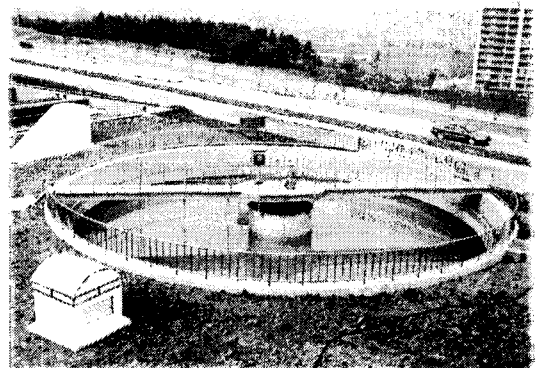


Fig. 1 Photograph of Sedimentation Tank with a Feed Well inlet tube

기존의 원형침전에 갖을 두른 형태로서 수직 상승류의 방향을 180°전회시키는 방법으로 사용하였던 Feed-well (이하 FW로 표기)형의 유입정을 장착했을 때, 얻어진 자료를 기초로 하여 표본을 삼았다. 확대노즐관과 16개의 출구 베인으로 구성된 Divergent Nozzle (이하 DN으로 표기)형을 제작하여 출구베인 각의 변함에 대하여 자연스런 선회유동이 발생되도록 하였다. (Fig. 2) 따라서 침전지의 기하학적 형태는 그대로 유지하면서 중심에 놓여지는 유입정 출구의 기하학적 형태를 두 가지 경우로 제한하여 비교분석하도록 하였다. 이 때, 기존의 FW형태는 기하학적 형상이 잘 알려져 있으나 DN형은 자세한 사양이 알려져 있지 않기 때문에 상당한 부분(즉, 크기와 설정 위치)을 추정하여 최종 형상을 확정했다.

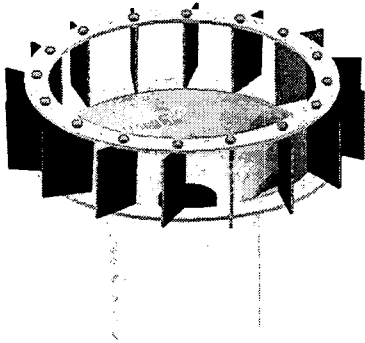


Fig. 2 Schematic Drawing of Divergent Nozzle with Vanes

본 실험을 위하여 구성된 실험장치는 Servo Tank, 유량계, 침전지 1/7모델 및 광학장비와 계측장비들로 구성되어 있다. Fig. 3 과 같은 유동회로에서 약 7m 높이의 Servo tank에서 일정하게 공급된 유체는 유량계와 밸브를 이용하여 유량을 제어한 후에 유입정 출구에서의 속도를 약 0.1m/sec 정도로 조절하여 유입정 입구에 벌집망과 스크린 등을 통과한 후 최대한 정수하게 유입되도록 하였다.

### 3.1. 가시화 실험

가시화실험은 두 유입정이 만들어내는 유동의 형상

을 상대적으로 관측하기 위하여 실시되었다. 가시화실험에 의해서 관측될 유동은 주로 유입정 상단부에서 아래쪽에 치우쳐서 침전지 밀면 근처로 이동하는 특성

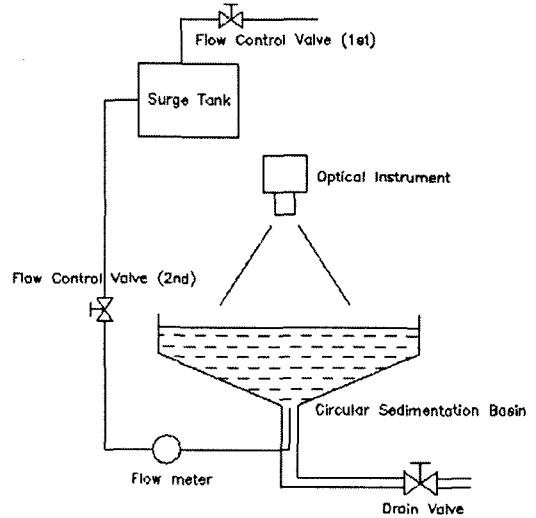


Fig. 3 Schematics of Flow Circuit and Control Valves

을 보여주는 것이 물보다 밀도가 큰 슬러지의 침강 특성을 보기에 유리하다. 따라서 가시화에 사용된 유액은 에나멜 계열의 점도가 묽은 잉크를 사용하였으며 유입정 출구에서 가는 플라스틱관(1mm 직경)으로부터 층상의 분사류를 이루면서 유동에 섞이면서 특히, 밀면 근처의 유맥선을 만들어 내도록 하였다. 또한, 두 개의 유입정에 대한 특성을 비교하기 위하여 서로 색깔이 다른 잉크를 뒷면에서 볼 때, 반경방향으로 서로 반대로 분출되게 하여 밀면 근처에서 저속으로 퍼져 나갈 때, 약 3m높이의 관측 면에서 8mm 비디오카메라로 Streak line의 형성과정을 기록하였다. 이 때, 잉크가 모델침전지의 정수압에 의하여 자연 분출이 어려우므로 잉크를 담은 탱크의 수두를 약 1.0m정도로 높여 초기분출을 강제로 유도하여 잉크의 유입을 순조롭게 유도하였다.

### 3.2. CFD 실험

CFD 계산에 사용되어진 대상은 중앙 공급식으로 설치된 안동시 하수처리장으로서 Fig. 1 에 개략적으로 도시한 바와 같이 본 침전지는 원형 우물, 웨어, 스크레이퍼와 구동장치 등으로 구성되어 있으나 계산의

편의를 위하여 스크레이퍼를 배제한 상태에서의 침전지 내의 유동만을 계산하였다. 가시화 및 LDV 실험과는 대조적으로 실제와 동일한 크기의 계산이 가능하므로 위 절에서 언급한대로 최대한 실제와 가까운 조건을 대입하여 계산 조건을 설정하였으며 이상적으로 축대칭의 기하학적 형상을 가정하여 각 위상면을 Fig. 4, 5 와 같은 축 대칭적 계산 면으로 선정하여 계산한 후에 포괄적인 3차원 계산이 가능하도록 구상하였다. Fig. 4 는 FW형의 유입정과 웨어로 구성된 기존의 침전지 형상이며 특히, FW의 천정은 자유수면과 일치되도록 하였다. Fig. 5 는 DN형의 유입정을 가지며 유출관이 잠수되어있는 침전지의 격자 면으로서 향후 적용하고자 하는 이상적 침전지 형상이다. 이때, DN형의 천정위치와 출구 배인의 위치는 여러 번의 계산을 시행하여 경사 배인에 의하여 선회유동과 밀면 근처로 순환유동이 나타날 수 있는 조건 하에서 위치를 선정하였다. 두 개의 격자 면들에서 보는 바와 같이 벽면과 코너에서는 조밀한 비정열격자(unstructured grid)를 구성하여 유입정 근처와 침강우물 및 유출 웨어 또는 잠수관 근처에서의 유동예측에 고회상격자가 구성되도록 하였다. 계산은 FIDAP solver를 사용하여 전산 수치해석 하였다.

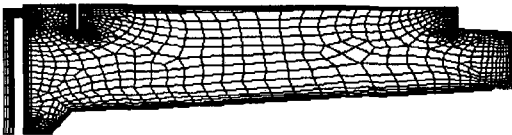


Fig. 4 Grid Structure of Sedimentation Tank with Feed Well inflow tube

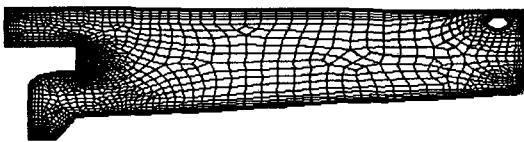
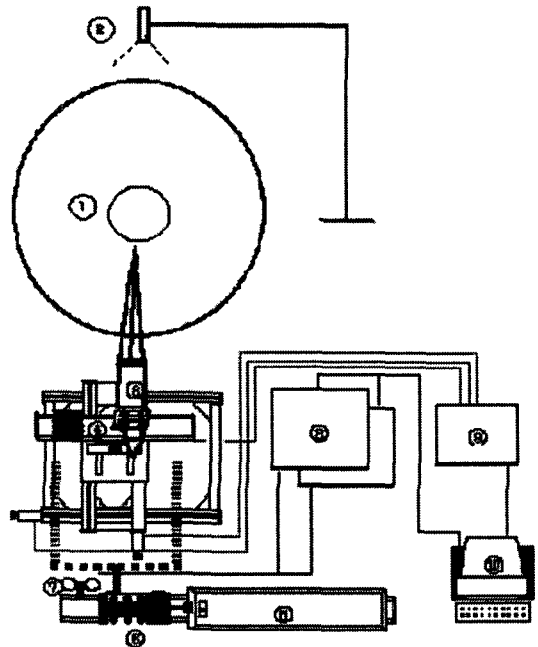


Fig. 5 Grid Structure of Sedimentation Tank with Divergent Nozzle

### 3.3. LDV 실험

LDV 장치는 4W용량의 Argon-Ion레이저(Spectra

Physics)와 파형스펙트럼분석기(BSA, Dantec)로 구성된 장치로서 광분리기, 광섬유커플러, 광확산 및 수집기를 통하여 후행반사 방식의 도플러 효과를 처리하는 푸르브 방식의 광학 장치를 활용하였다. 레이저 빔은 광분리기에 의하여 파장의 길이가 각각, 514.5nm, 488nm인 두 개의 청색 빔과 두 개의 녹색 빔으로 구성하여 직경 1mm정도의 타원형의 측정체적에 초점을 구성하도록 되어있다. 푸르브의 이송은 0.8 $\mu$ m의 공간 분해능을 가지는 3차원 이송장치를 이용하였고 각 측정점에서는 1K이상의 샘플을 채취하였으며 Fig. 6 과 같이 특정 위상면의 일부 사각면을 측정공간으로 선정하여 반경방향과 상하 방향으로 이송하여 측정하였다.



- |                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| ① Divergent Nozzle  | ② Camcorder        |
| ③ Optic Probe       | ④ Traverse         |
| ⑤ Argon-Ion Laser   | ⑥ Beam Separator   |
| ⑦ PM Tube           | ⑧ Signal Processor |
| ⑨ Step Motor Driver | ⑩ Computer         |

Fig. 6 Top-viewed Experimental Layout of Sedimentation Tank and LDV system

## 4. 실험 결과

위에서 제시된 3가지의 실험 방법을 통하여 얻은 결과들은 다음과 같다.

### 4.1. 가시화 실험 결과

FW와 DN의 비교실험을 통하여 얻어진 유적선의 결과를 Fig. 7, 8 에 나타내었다. 그림들은 유입정에서 저수조로 유입되는 경우의 각각의 유입상태를 수직면 상에서 촬영한 것으로서, FW의 경우 수직갯의 코너 (corner of feed-well cap) 부분에서 이미 난류가 충분히 발달하고 반발에 의하여 수직 하향하는 유동구조를 나타낸다. 반면에, DN에서는 나팔관의 표면을 따라



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



Fig. 8 Visualization of Streak lines captured by the laser sheet in rz-plane of DN type inflow device

서 이루어지는 코안다 효과에 의하여 자연스런 하향유동이 만들어지고 상당한 동안 층상의 구조가 유지되어 침전지의 슬러지 부상을 억제하는 효과를 예상할 수가 있어서 유리한 것으로 관찰된다.

Fig. 9는 수평면을 관찰한 것으로서 각각의 유입정을 떠난 후에 저수조 밑면 근처에서 이루어지는 유적선의 거시적 구조를 관찰한 것이다. FW의 경우 다양한 유동 조건에 대하여 매우 산만한 난류형상의 유적선이 전개되는 것을 관찰할 수 있다. 특히, 대부분의 하향유동에 의한 유로가 단궤도(short path)를 이루면서 방사형의 유로를 형성하나, 유입정 근처에 집중되므로 전체 면적을 활용하지 못하는 단점이 지적된다. 이 경우 유입정에서의 유출조건이 탈 축대칭으로 만들어질 때 회류할 수 있는 조건이 없으므로 Scraper 가동 시에 특정 부위에 집중적인 부하가 발생하므로 불규칙한 운전 조건이 예상된다. 반면에 DN은 같은 유출조건에서도 완만한 방사형 방향의 유로를 구성시킴으로 전체면적을 활용하며 외부의 구동력이 없어도 전체적으로 회류조건을 형성시킴으로 탈 축대칭 조건이 발생할 경우에도 FW의 경우보다 균질한 침강조건을 제시한다. 이는 근본적으로 기존의 방법에 비하여 같은 유입조건에서 유동궤적을 길게 하므로 단계적의 비효율적인 침강조건을 개선하게 된다. 이러한 특성들은 슬러지 제거 시에도 Scraper에 대한 부하율을 떨어뜨리므로 매우 효율적인 시스템으로 관측된다.

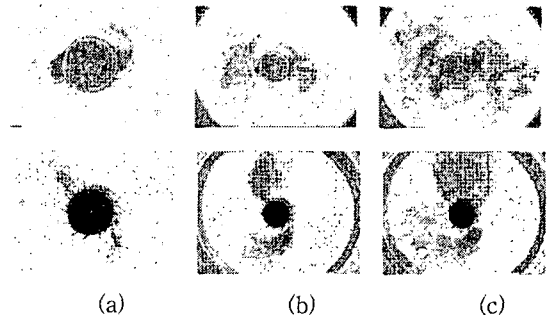


Fig. 9 Top views of Streak lines for both inlet tubes;

- (a) Injection of inks at edges of FW(upper) and DN(lower)
- (b) Flow visualizations; short path(upper) and swirl path(lower)
- (c) Dispersion and Swirl invasion

## 4.2. CFD 실험 결과

중앙공급식의 A 하수처리장을 모델로 하여 계산된 결과로서 하루 동안 하수처리량을 초당유입유량(Q)으로 환산하여 0.1563m<sup>3</sup>/sec로 하고 제시된 유입관 단면적(A<sub>w</sub>) 0.385m<sup>2</sup>에서 다음의 연속방정식을 사용하여 정상상태의 초기 유입속도(V<sub>w</sub>)는 0.422m/s으로 계산하였다. (Red = 3.4x10<sup>5</sup> d; 유입정 직경)

$$Q = VA$$

또한, 축대칭(r, z) 비압축성 정상 유동방정식을 활용하고 위 면에서는 자유수면 경계조건, 저수조 벽면에서는 점착조건, 그리고 유입관 중심(r=0)에서는 노이만(Neuman) 조건 등을 경계조건으로 하고 특히, 자유수면의 수위가 일정한 조건으로 계산한 결과들을 Fig. 10~18 사이에 나타내었다.

이 결과들은 Fig. 4 에서와 같이 FW형의 축대칭인 원형침전지에서의 특정 θ면(즉, rz면)에서 유입정 내부와 웨어 근처의 유동구조가 매우 복잡하므로 조밀 격자를 구성하여 불규칙격자를 구성하여서 계산되었다. Fig. 10 은 FW이 선회 성분이 없으므로 유입정 내부에서의 강한 와류, 침전지 중앙에서의 와류 및 웨어 근처의 약한 와류들에 의한 와류링을 형성하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11 은 유입정 내에서의 유동구조로서 갓 코너에서 강한 와류가 만들어지는 것을 볼 수 있다. 초기에 침전지 축방향의 강한 유동은 천정의 커버와 갓 코너에 의하여 충분한 양의 모멘텀 손실이 이루어지므로 운동에너지를 잃은 하강유동이 형성된다. 그러나 중심관 근처로 쏠리는 유동에 의하여 벽면근처에서는 여전히 강한 하강유동이 발생하여 자연 침전된 슬러지를 재부상 시키는 에너지가 남아있다. Fig. 12 는 압력분포를 나타낸 그림으로서 반경 5~6m 부근에서 최소압을 나타내어 큰 와류의 회전중심이 되고 있음을 알 수 있다. Fig. 13 은 속도 벡터 분포도로서 침전지 밀면에서의 경계층을 제외한 유동구조이다. 이들을 기초로 하여 식(4)를 활용하여 전단응력 분포를 분포도(Contour Plot)로 Fig. 14 에 표현 하였다. 따라서 플록 형성에 도움이 되는 전단응력의 분포를 속도구배에 의하여 도식화함으로써 플록 형성과 전단응력분포에 관한 경험적 자료가 만들어지면 이상적인 유동구조를 형성하는 Map을 형상화하여 침전의 효율을 높이는 방법으로 활용할 수 있다.

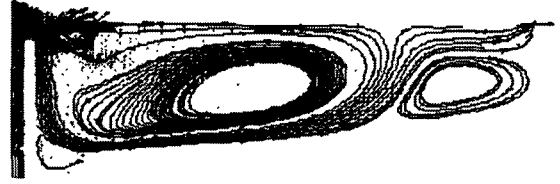


Fig. 10 Streamlines in rz plane of Feed Well type

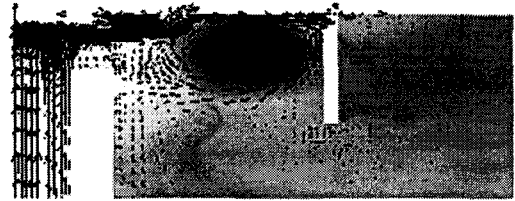


Fig. 11 Flow and Pressure characteristics near the corner of feed well cap

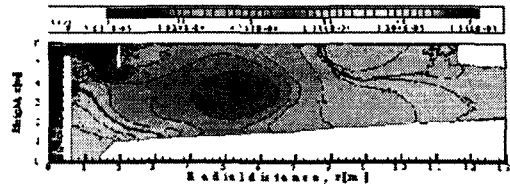


Fig. 12 Pressure distributions in rz plane of FW



Fig. 13 Velocity vector field on rz plane of FW

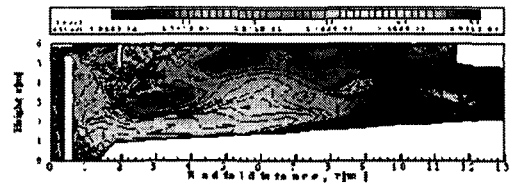


Fig. 14 Profiles of shear stresses on the rz plane of FW

DN형의 유동특징을 살펴보기 위하여 앞 절의 Fig. 5 와 같이 DN형의 계산격자로서 역시 불규칙 격자를 설정하고 특히 출구쪽(Tulip Exit)과 수집관(Receiving Pipe) 근처를 조밀격자로 만들어 계산하도록 하였다. 자유표면에서의 Scum의 발생과 풍속에 의한 표류효과를 없애기 위해서는 본 격자 그림과 같이 잠겨진 수집관을 사용하는 것이 이상적이나 본 보고서에서는 수집관 대신에 웨어림(Weir Rim)을 가정하여 FW형의 특성과 상대적 비교 특성을 얻고자 한다. 이에 대한 격자구조는 채차 그리지 않았다. 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. 기본적으로 반경은 FW의 반경으로 하고 출구 폭은 갖의 폭과 동일하게 하고 주로 출구의 수직 위치를 최적화하여 그림과 같이 자유수면으로부터 1.7m 잠수되도록 하였다. 초기 구조는 천정을 없앤 나팔형의 튜입 구조로 계산하였으나 대부분의 유동이 자유수면까지 솟구친 후 바로 수집관으로 빠져나가는 유동구조만 나타나므로 최종적으로 천정을 설치하여 내부 순환유동 구조를 갖도록 하였다.

Fig. 15 는 DN의 계산된 벡터장과 유선군을 나타낸 것으로 출구 면에서 코안다 곡면에 따라 만곡된 하강유동이 발생되어 코안다 효과를 가지는 모습을 관찰할 수 있다. 따라서 출구를 빠져나오면서 하강한 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. 이렇게 만들어진 유로는 와류특성에 원주방향의 선회성분이 동시에 발생하므로 3차원적으로 충분히 긴 유로를 형성하여 FW이 가지는 단회로의 결점을 없앨 수 있는 성능을 가진다.



Fig. 15 Streamlines and velocity vectors in rz plane of DN

Fig. 16 은 자유수면과 DN 천정면 근처의 수평면상에서 만들어지는 선회류를 나타낸 것으로 하단의 마찰저항이 없는 곳에서는 상당히 강한 선회류를 제시하는 것으로 관측된다. Fig. 17, 18 은 rz면에서의 속도 및 등압력선을 나타낸 것으로 중간부분의 하단에서 저압조건이 발생되므로 출구에서 하강하는 코안다 효과를 돕는 분포를 가지게 됨을 알 수 있다. Fig. 19 는 Fig. 18 의 속도분포도에서 앞 식(4) 를 이용하여 전단력 분포를 얻어낸 분포도로서 FW보다 광범위한 부분에서 우수한 전단력을 확보하고 있음을 알 수 있다. 앞서 말한바와 같이 플록 형성에 도움이 되는 특정한 크기의 전단력이 요구되는 상황이 발생할 때, DN 방법에 의한 인위적 전단력을 광범위하게 발생시킬 수 있는 방법이 될 수 있음을 보여준다.

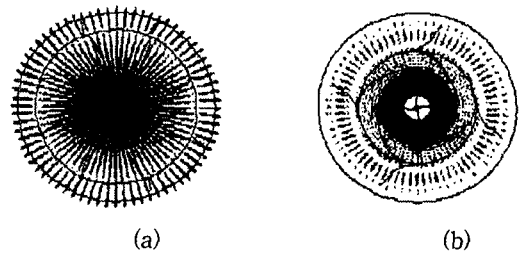


Fig. 16 Top views of velocity vectors at (a) free surface and (b) 4m depth of DN, respectively



Fig. 17 Velocity field and Pressure contour on rz-plane of DN



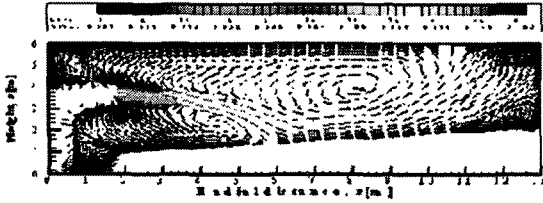


Fig. 18 Velocity vector field at rz-plane of DN

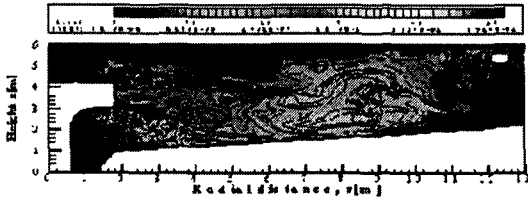


Fig. 19 Stress field calculated by velocity field on rz-plane of DN

Fig. 20 은 rz단면을 가시화한 FW침전지의 유동장과 계산된 벡터장과의 신뢰성 확인을 위한 비교 그림으로서 특히, 8, 9m 근방 하단부의 두 와류의 충돌에 의한 정체된 모습의 Streak line들과 속도 벡터들을 잘 가시화 시키고 있다.



Fig. 20 Superposition of streak lines and velocity vector calculated on rz-plane of FW

또한, Fig. 21 은 DN의 중간 회전면에서의 가시화 장면과 벡터장과의 비교 그림으로서 그 비교 자체의

신뢰성은 떨어지는 것을 알 수 있다. 그렇지만 가시화 유액은 자체의 밀도에 의하여 침전조의 밀면 근처에 밀집된 상태이며 특별히 밀면 자체가 약 8°의 경사각을 가지고 있으므로 두 자료의 비교는 적절치 못하지만 위에서 관찰된 유동실험의 대체적인 성향들은 비교할 수 있었다.

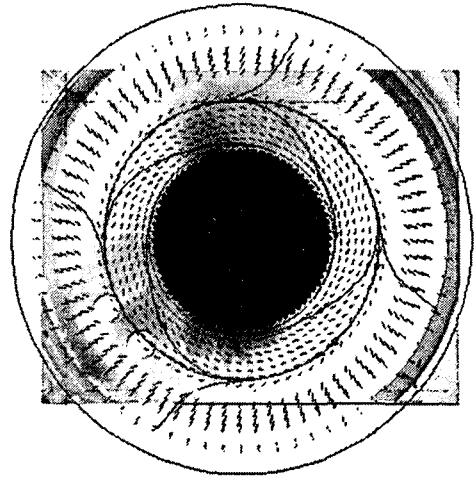


Fig. 21 Top view of superposed images by streak lines and velocity vectors of DN

#### 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. 이러한 이유는 여러 복합요인이 있었지만 본 실험의 경우와 같이 매우 낮은 유동장을 측정하기에는 LDV 계측 상 많은 문제가 선결되어야 함을 인식하게 된 실험이었다. 따라서 본 연구에는 예비 실험된 결과를 가지고 분석된 정보를 이용하여 본격적인 실험을 수행할 경우에 대한 선결조건들을 나열하는 것을 목표로 한다.

본 실험에서는 부유물질(Seeder)로서 현재까지 저속에서 가장 회상력이 우수한 것으로 알려진 Hollow glass를 사용하였다. 이 부유입자는 직경이 8~12 $\mu$ m 정도이고 비중이 1.05~1.15로서 정수처리 대상의 혼탁액의 조건에 가까운 입자의 조건을 갖춘 것으로 생각된다. 그러나 그 조성이 유기물을 함유한 성분을 가

지고 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.

본 실험에서 제안된 LDV의 측정 구간은 수조의 rz면상에서 DN의 경우를 기준으로 하여 선정하였다. 즉 수조의 특정 원주구간 중에서 일부분을 직선면으로 개조하여 원주방향으로 80mm의 직각창을 설치하여 LDV의 Probe에서 분사된 빔 각에 의한 제한 조건을 극복하였다. 따라서 z방향으로 최대칭인 수조의 특정 위상면에서 z방향으로는 160mm, r방향으로는 380mm의 사각 단면을 선택하여 20mm의 정사각 격자점을 선택하여 실험을 수행하였다. 따라서 측정구간은 반경방향으로는 DN의 주유입관의 벽면에서부터 반경방향으로 380mm, 수직방향으로는 노즐의 천정에서 60mm 상부에서 시작하여 하단 160mm 구간이 설정되어 DN으로부터 분출된 유동에너지가 가장 집중된 유동영역을 측정하도록 하였다.(Fig. 22 참조)

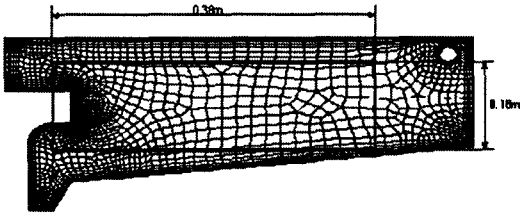


Fig. 22 Measurement volumes of LDV experiments

위와 같은 제한된 조건과 2차원실험의 한계를 가지고 있는 LDV장치에 의하여 z,θ의 속도성분만을 측정하도록 구성되었기 때문에 본 실험 장치에 의하여 얻어진 실험 결과들을 Fig. 23~26 까지는 z방향 속도성분만을, Fig. 27~30 까지는 회전성분만을 나타내었다. 우선 z방향 속도분포를 보면 Fig. 23 과 26의 경우만 전체 유동장에서 유동분포를 볼 수 있었다. 이는 실험 조건이 DN의 깃 각도가 유량조건에 따라 측정조건이 성립되는 것을 보여준다. 특히, 깃 각이 30°인 경우 유입속도가 빠를 경우만 측정이 가능하고 15°인 경우는 상대적으로 저속의 유동측정이 가능해지므로 LDV에 의한 속도측정은 본 실험에서 제시된 부유입자의 경우

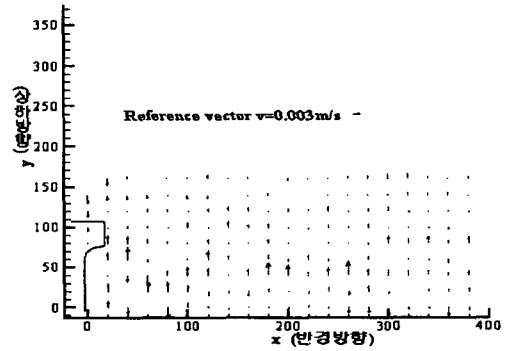


Fig. 23 Vertical velocity distribution on rz-plane at 30. of vane angle and 0.4m/sec of inflow velocity

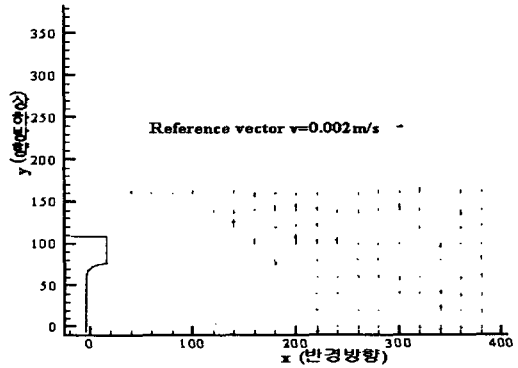


Fig. 24 Vertical velocity at 30. and 0.3m/sec

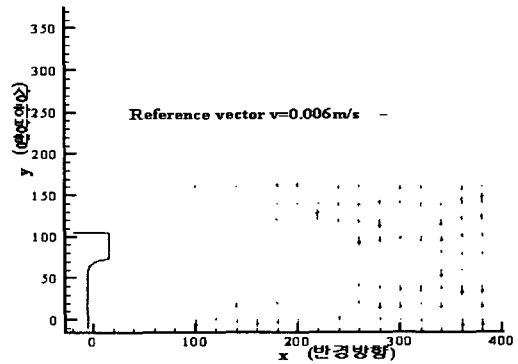


Fig. 25 Vertical velocity at 15. and 0.4m/sec

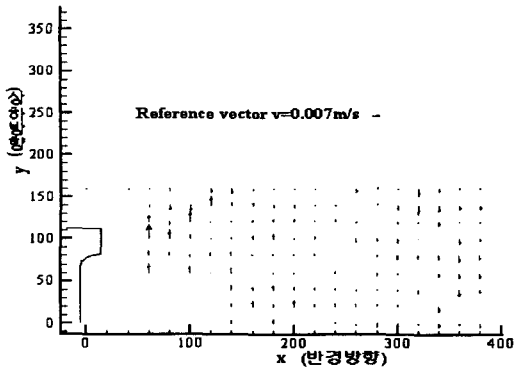


Fig. 26 Vertical velocity at 15. and 0.3m/sec

는 유량과 깃 각에 대하여 함수형태를 보여준다. 높은 깃 각의 경우는 미약하지만 전반적으로 z방향으로 상승유동이 존재하고 깃 각이 낮은 경우는 유입점 근처에서는 상승류 먼 반경에서는 하강류가 형성되어 전반적으로 낮은 깃 각에서의 선회성분이 우수한 것으로 관측된다.

이러한 사실은 Fig. 27과 30의  $\theta$ 방향 회전성분으로도 관찰해 볼 수 있는데  $30^\circ$ 인 경우 선회성분이 DN의 출구 근처에서만 강하게 나타나는 반면에  $15^\circ$ 인 경우는 상대적으로 광범위한 영역에 걸쳐서 분포하여 저속이지만 낮은 깃 각에서의 선회성분이 우수한 것으로 관측된다. 따라서 여러 깃 각에 대하여 실험을 수행하지 않았지만 전반적으로 낮은 깃 각의 베인을 가지는 DN 유입점의 형태가 바람직한 것으로 판단할 수 있으며 이 경우 구체적인 베인 각도는 유입유량에 따른 적정 깃각을 함수형태로 설정해야 함을 경험할 수 있었다.

위의 관찰된 사실은 DN에만 실험을 실시하였는데 이는 FW의 경우 LDV장치를 이용한 실험에 의한 속도 측정방법이 부유물질의 측정조건을 설정하는 작업 등이 비효율적이고 낭비적 요소가 많은 반면에 가시화에 의한 목적에 의하여 슬러지가 적체된 지면으로 급강하 하는 유동을 충분히 감지할 수 있기 때문에 DN에만 실험을 제한하였다.

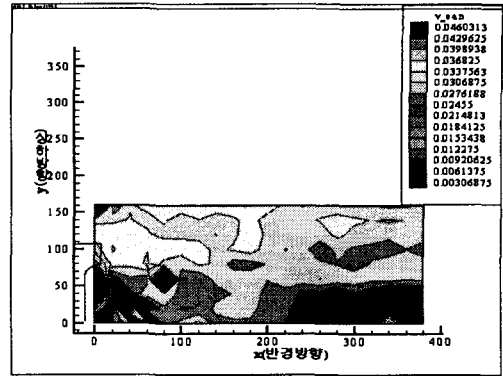


Fig. 27 Swirl velocity contour in rz-plane at 30. and 0.4m/sec

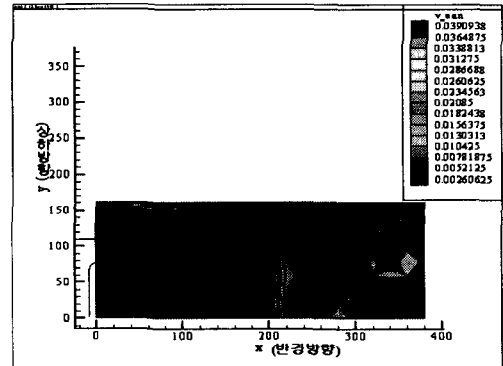


Fig. 28 Swirl velocity contour at 30. and 0.3m/sec

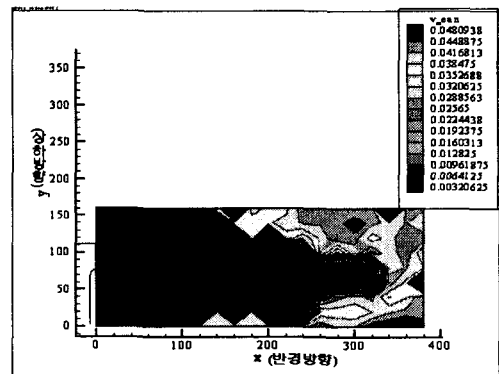


Fig. 29 Swirl velocity contour at 15 and 0.4m/sec

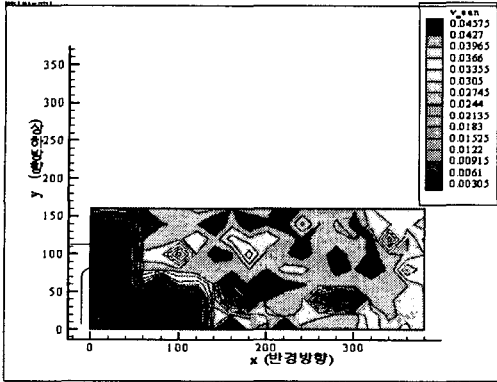


Fig. 30 Swirl velocity contour at 15. and 0.3m/sec

## 5. DN의 장점

이상과 같이 두 가지 형태의 입수방식을 가지는 동일한 침전지 내에서의 유동 특성에 대하여 수치적, 실험적 관찰들을 수행하였다. 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 유로 길이가 DN의 출구 배인 각이 15°를 선택할 경우에 단편적으로 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 플록 형성에 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 침전지 내의 유로(particle path)를 길게 할 수 있다.
2. 유량 조절 뿐만 아니라 배인 각의 조절에 의하여

플록 형성에 도움이 되는 속도 구배를 조절할 수 있다.

3. 침전지 밑면 전체에 걸쳐 균질한 슬러지 침강을 유도할 수 있다.

4. 침전지 전체에 걸쳐 상시 저속의 회전 유동 조건을 제시하여 슬러지 수집기의 소요 동력을 절감할 수 있다.

5. 유입정의 압력 강하치가 FW형보다 매우 적기 때문에 유량공급용 펌프의 동력이 절감된다.

## 6. 향후 개선점

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

1. DN 형식을 나팔(horn)형으로 할 것인지 본 연구와 같은 천장을 가지는 캡(cap)형으로 할 것인지 검토를 필요로 한다.
2. 침전지 크기에 따라서 상단부 및 하단부의 영역에서 충분한 회전을 동반하는 DN 출구면의 위치(깊이)를 최적화할 필요가 있다.
3. 일정 시간 동안의 처리 용량에 따르는 DN 배인 각을 고정 또는 변동적으로 처리하여 최적화 한다.
4. 플록 형성에 도움을 주는 속도구배 조건을 수집하여 유량과 배인 각의 함수관계를 모델링 한다.
5. 장시간 운전 시에 동반되는 선회류를 형성하기 위한 소요 동력을 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 배인각을 사용함으로써 전단 응력장을 제어할 수 있는 가능성을 확인 하였다. 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 것 크기를 유지하여 배인 출구가 위치하도록 제안할 수 있으며 16개의 배인으로서 배인 각은 15-20. 전후의 값이 유리할 것으로 확인되었다. 이 때, DN 형상은 Horn 형보다는 Cap 형상이 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.

한편, 본 연구를 통해 그동안 전적으로 해외 연구 자료에 의존하였던 침전지 분야의 열악한 기술 분야를 가일층 발전시키고 국내의 고유 기술로 정착할 수 있어서 동 분야의 기술 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 중소기업청에서 시행한 중소기업 기술 혁신 개발 사업의 기술 개발 결과이며, 본 연구에 동참한 영남대학교 기계공학부 제위계 감사의 뜻을 표합니다.

## 참고문헌

- (1) 동화기연(1992), “폐수처리공학”.
- (2) 환경부(1995), “폐수종말처리시설의 설계”, 환경부.
- (3) 동화기술(1995), “폐수처리공학”.
- (4) Susumu Kawamura저, 수도연구회, 강창호, 고인준, 김기성, 김형업, 손창섭, 신원우, 이희성, 최상일, 최승일, 한무영, 현인환 공역(1997), “정수 시설의 최적설계 및 유지관리”, (주)그린테크노.
- (5) Tom D. Reynolds, Paul A Richards 저, 서명교, 신항식, 안갑환, 전항배, 최윤찬 공역(1998), “폐수처리 단위조작”, (주)사이텍미디어.
- (6) 환경공무원교육원(1998), “수질 방지 시설 기술 요원반”.
- (7) 방기운, 박종웅(1998), “환경제도의 설계”.
- (8) 한국 산업기술진흥협회(1998), “산업기술 백서”.
- (9) Camp. T. R.(1946), “Sedimentation and the Design of Settling Tanks”, Trans. ASCE.